

Konzept zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Tristan Herbst
geboren am 18.10.1977
aus Eberswalde

Eingereicht am: 30. Januar 2015
Disputation am: 14. September 2015

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann
Dr. rer. nat. Birgit Meng, Dir. u. Prof.
Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke

– Konrad R.W. und meinen Großeltern –

Per aspera ad astra

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand ausgehend von meiner Tätigkeit an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin. In den Jahren 2008 bis 2013 war ich als Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe „Ressourcenschonung durch Reststoffverwertung“ mit dem Themenschwerpunkt „Nachhaltigkeit“ an verschiedenen Forschungsvorhaben beteiligt. Anstoß zur vorliegenden Arbeit gab schließlich das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderte IGF-Vorhaben „Nachhaltigkeitsanalyse für das Mauerwerksrecycling“. Dieses Forschungsvorhaben wurde im Zuge des von der deutschen Mauersteinindustrie initiierten Gemeinschaftsprojekts "SIM Stoffkreislauf im Mauerwerksbau" durchgeführt.

Bedanken möchte ich mich nun bei allen, die mich bei der Arbeit unterstützt haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann, Leiter des Fachgebiets „Baustoffe und Stahlbetonbau“ am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, danke ich sehr für die vertrauensvolle Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung meiner Dissertation und der Berichterstattung.

Mein herzlicher Dank gilt Frau Dr. rer. nat. Birgit Meng für ihre fachliche Betreuung und Unterstützung beim Entstehen dieser Arbeit. Ihre wertvollen Anregungen und kritischen Anmerkungen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Darüber hinaus danke ich ihr für die Übernahme des Berichts.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke, der freundlicherweise als weiterer Berichtersteller zur Verfügung stand. Ebenso danke ich Frau Prof. Dr.-Ing. Tanja Kessel für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterer Dank geht an Kollegen der BAM und aus anderen Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Unternehmen. So möchte ich Frau Melanie Goymann, Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller, Frau Sarah Schneider, Frau Dr.-Ing. Karin Weimann, Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Herrn Dr.-Ing. Guntram Kohler und Herrn Harald Kurkowski für zahlreiche wertvolle Hinweise zu den Themen Recycling von Mauerwerk, Ökobilanzierung und Nachhaltigkeitsanalyse danken. Herrn Nico Vogler danke ich für die IT-Unterstützung.

Mein aufrichtiger Dank gilt Frau Dr. rer. nat. Katrin Rübner. Ihre ununterbrochene Unterstützung hat mich sehr berührt und immer wieder bei der Umsetzung dieser Arbeit bestärkt. Ihre Ratschläge, fachlichen Hinweise und kritischen Beiträge zur Dissertationsschrift und zum Disputationsvortrag haben wesentlich zum positiven Abschluss beigetragen.

Nicht zu Letzt gilt mein „herbstlichster“ Dank meiner Familie; ganz lieben Dank an meine Frau Silka für ihr entgegengebrachtes Verständnis und das Motivieren in den entscheidenden Momenten beim Entstehen dieser Arbeit. Ebenso danke ich meiner Mutter Christiane für das geduldige und sorgfältige Korrekturlesen der Dissertationsschrift.

Inhalt

Verzeichnisse	3
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	6
Symbolverzeichnis	7
1 Einleitung	9
1.1 Problemstellung	9
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	11
2 Bedeutung der Bewirtschaftung von Baurestmassen	13
3 Lebensendphase von Mauerwerk	16
3.1 Mauerwerk und verwendete Baustoffe	16
3.1.1 Allgemeines	16
3.1.2 Mauersteinarten	17
3.1.3 Mauermörtel und Putz	18
3.1.4 Weitere Mauerwerkbaustoffe	18
3.2 Abbruch und Rückbau von Mauerwerk	19
3.3 Aufbereitung von Mauerwerkbruch	26
3.3.1 Allgemeines	26
3.3.2 Aufbereitungsverfahren und -technologien	27
3.3.3 Anlagentypen und -konfigurationen	30
3.4 Zusammensetzung und Eigenschaften von Mauerwerkbruch	35
3.5 Mengen und Anwendung von Mauerwerkbruch	41
4 Bewertung von Prozessen und Produkten	46
4.1 Bewertungsansätze	46
4.2 Analysemethoden	46
4.2.1 Allgemeines	46
4.2.2 Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)	47
4.2.3 Nutzwertanalyse (NWA)	49
4.2.4 Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA)	52
4.3 Analyseinstrumente und Bewertungskriterien	55
4.3.1 Allgemeines	55
4.3.2 Materialqualitäten	55
4.3.3 Stoffflussanalyse (SFA)	56
4.3.4 Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA)	57
4.3.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	62
4.3.6 Betrachtung sozialer Aspekte	62
5 Bisherige Arbeiten zur Bewertung der Lebensendphase von Bauwerken	64
6 Erarbeitung des eigenen Bewertungskonzepts	68
6.1 Untersuchungsgegenstand, Bewertungsansatz und Analysemethode	68
6.2 Zielanalyse für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk	70
6.3 Definition von Grundbedingungen	74
6.4 Stoffflussanalyse für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk und Modellierung	79
6.5 Wirksamkeitsanalyse	86
6.6 Kostenanalyse	88
6.7 Szenarienvergleich	90
6.8 Eigenes Bewertungskonzept	92

7	Exemplarische Anwendung des eigenen Bewertungskonzepts	93
7.1	<i>Stoffflussanalyse, Ökobilanzierung, Betrachtung sozialer Aspekte.....</i>	93
7.2	<i>Kompatibilitätsprüfung zur Grundbedingung "Stoffliche Zusammensetzung"</i>	94
7.3	<i>Wirksamkeitsanalyse für die Beispielszenarien</i>	102
7.4	<i>Kostenanalyse für die Beispielszenarien</i>	103
7.5	<i>Vergleich der Beispielszenarien.....</i>	103
8	Abschließende Einschätzung des eigenen Bewertungskonzepts.....	105
8.1	<i>Anwendbarkeit und Einordnung in bisherige Arbeiten</i>	105
8.2	<i>Grenzen des Bewertungskonzepts</i>	106
9	Zusammenfassung und Ausblick	110
10	Literatur- und Quellenverzeichnis	115
11	Anhänge	130
11.1	<i>Auszüge aus AbfRRL, KrWG und EU-BauPVO.....</i>	130
11.2	<i>Beispielberechnungen.....</i>	136
11.2.1	<i>Beschreibung des Beispielbauwerks.....</i>	136
11.2.2	<i>Beschreibung der Beispielszenarien</i>	137
11.2.3	<i>Technisch-wirtschaftliche Basisdaten für die Beispielbetrachtungen</i>	144
11.2.4	<i>Verwendete GaBi-Datensätze</i>	145
11.2.5	<i>Einzelergebnisse der Wirksamkeitsanalyse</i>	146
11.2.6	<i>Kostenermittlung für die Beispielszenarien</i>	147

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Lebensendphase von Bauwerken.....	9
Abb. 1.2: Umfang einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung	11
Abb. 2.1: Lebenswege mineralischer Baustoffe	14
Abb. 3.1: Konstruktionsarten der 2010 in Deutschland genehmigten Wohnbauten [40]	17
Abb. 3.2: Fließschema für eine einfache mobile Aufbereitungsanlage [126]	33
Abb. 3.3: Fließschema für eine einstufige stationäre Aufbereitungsanlage [126]	34
Abb. 3.4: Fließschema für eine zweistufige stationäre Aufbereitungsanlage [126]	34
Abb. 3.5: Rohdichteverteilung der Bestandteile einer Probe aus ziegelhaltigem Mauerwerkbruch [178]	36
Abb. 3.6: Absatzentwicklung für Mauersteine von 1996 bis 2006 in Deutschland [39]	41
Abb. 3.7: Jährlich anfallende Mengen an Mauerwerkbruch gemäß Schätzung nach [177]	42
Abb. 3.8: Anwendung von Recyclingbaustoffen in Deutschland im Jahr 2012 [149]	43
Abb. 4.1: Ablaufschema für eine Kosten-Nutzen-Analyse, geändert nach [23]	48
Abb. 4.2: Ablaufschema für eine Nutzwertanalyse geändert nach [23]	50
Abb. 4.3: Ablaufschema für eine Kosten-Wirksamkeitsanalyse geändert nach [23]	52
Abb. 4.4: Vereinfachtes Modell einer Stoffflussanalyse (Input-Output-Betrachtung)	57
Abb. 4.5: Phasen einer Ökobilanz geändert nach DIN EN ISO 14040 [71]	58
Abb. 4.6: Umweltproduktdeklaration im Lebenszyklus von Gebäuden nach DIN EN 15804	62
Abb. 6.1: Untersuchungsgegenstand der Arbeit, Bewertungsansatz und Analysemethode	69
Abb. 6.2: Erarbeitungsschritte für das eigene Bewertungskonzept auf Basis der KWA	69
Abb. 6.3: Zielhierarchie zur Bewertung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk	72
Abb. 6.4: Betrachtetes Untersuchungssystem „Abbruch und Aufbereitung von Mauerwerk“	82
Abb. 6.5: Grafische Darstellung zur Überführung von Zielkriterien in Teilwirksamkeiten	86
Abb. 6.6: Grafische Darstellung zur Minimierung eines Zielkriteriums	87
Abb. 6.7: Grafische Darstellung zur Maximierung eines Zielkriteriums	87
Abb. 6.8: Zusammenführung von Wirksamkeits- und Kostenanalyse zum Endergebnis	91
Abb. 6.9: Schematische Darstellung des eigenen Bewertungskonzepts	92
Abb. 7.1: SFA-Modell für Bewertungsszenario 1	95
Abb. 7.2: SFA-Modell für Bewertungsszenario 2	97
Abb. 7.3: SFA-Modell für Bewertungsszenario 3	99
Abb. 8.1: Untersuchungssystem im Kontext des modularen Lebenszyklus‘ von Gebäuden	106

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Herstellung und wesentliche Eigenschaften der künstlich hergestellten Hauptmauersteinarten [41], [191], [251] ...	20
Tab. 3.2: Abbruchverfahren und -technologien im Hochbau	22
Tab. 3.3: Eignung von Abbruchverfahren für verschiedene Baustoffe [160], [189], [236], [92]	22
Tab. 3.4: Vor- und Nachteile der Abbruchverfahren [47], [222], [236], [92]	25
Tab. 3.5: Auswahl eingesetzter Aufbereitungsaggregate [250], [126], [183], [33], [145], [239]	28
Tab. 3.6: Grundoperationen der Bauschutttaufbereitung und deren Ziele [173], [183], [239]	29
Tab. 3.7: Trocken- und Nasssortiervverfahren [250]	29
Tab. 3.8: Vor- und Nachteile der Trocken- und Nasssortiervverfahren [250], [33], [126]	30
Tab. 3.9: Vor- und Nachteile mobiler und stationärer Aufbereitungsanlagen [83], [17], [222], [33]	31
Tab. 3.10: Stoffliche Zusammensetzung von Mauerwerkbruch [212], [253]	36
Tab. 3.11: Physikalische Eigenschaften von Mauerwerkbruch [230], [253]	37
Tab. 3.12: Chemische Zusammensetzung von ziegelhaltigem Mauerwerkbruch [203]	37
Tab. 3.13: Schwermetallgehalte im Feststoff ausgewählter Proben aus Mauerwerkbruch [203]	38
Tab. 3.14: Schwermetall- und Salzgehalte im wässrigen Eluat der Probe MW 1 [203]	38
Tab. 3.15: Quellen ausgewählter Umweltparameter in Abbruchobjekten im Hochbau [216]	39
Tab. 3.16: Stoff- und korngößenspezifische Anwendungsmöglichkeiten für Mauerwerkbruch	44
Tab. 4.1: Rechenschema der Nutzwertanalyse geändert nach [23]	51
Tab. 4.2: Prinzipielle Form einer Kosten-Wirksamkeitsmatrix geändert nach [23]	54
Tab. 4.3: Ausgewählte Dokumente mit Anforderungen an RC-Baustoffe	55
Tab. 4.4: Auswahl von Wirkungskategorien mit Sachbilanzgrößen und Wirkungsindikatoren	60
Tab. 4.5: Auswahl ökonomischer Kenngrößen bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	63
Tab. 5.1: Auswahl bisheriger Arbeiten zur Lebensendphase von Bauwerken	66
Tab. 6.1: Generalziele für die Bewertung der Lebensendphase von Mauerwerk	71
Tab. 6.2: Zieluntergliederung und -gewichtung für Generalziel Z1	73
Tab. 6.3: Zieluntergliederung und -gewichtung für Generalziel Z2	74
Tab. 6.4: Anwendungsübergreifende Anforderungsparameter an die Materialqualität	75
Tab. 6.5: Auswahl anwendungsspezifischer Anforderungsparameter an die Materialqualität	75
Tab. 6.6: Definierte Stoffgruppen für die Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“	76
Tab. 6.7: Grenzwerte für die Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“	77
Tab. 6.8: Auswahl unterer und oberer Sollwerte für verschiedene Zielkriterien	79
Tab. 6.9: Transportprozesse im Untersuchungssystem getrennt nach Transporteinheit	84
Tab. 6.10: Zuordnung von Anwendungsmöglichkeiten zu definierten Anwendungsbereichen	85
Tab. 7.1: Prozessparameter für Abbruch, Aufbereitung und Transport in Beispielszenario 1	96
Tab. 7.2: Prozessparameter für Abbruch, Aufbereitung und Transport in Beispielszenario 2	98
Tab. 7.3: Prozessparameter für Abbruch, Aufbereitung und Transport in Beispielszenario 3	100
Tab. 7.4: Kompatibilitätsprüfung zur Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“	102
Tab. 7.5: Wirksamkeit-Kosten-Matrix für die Beispielszenarien	104
Tab. 8.1: Gegenüberstellung der Studien von Brunner et al. [23] und Clement et al. [33] mit der eigenen Arbeit	109
Tab. 11.1: Baustoffbezogene Mengeneinschätzung des Abbruchmaterials für „Massivbau 1918 bis 1948“ [160]	136
Tab. 11.2: Abschätzung der stofflichen Zusammensetzung des Mauerwerkbruchs	137

Tab. 11.3: Mögliche Leistungskennwerte für Abbruchmaschinen und -werkzeuge [147], [252]	144
Tab. 11.4: Mögliche Leistungskennwerte für Aufbereitungsaggregate [126]	144
Tab. 11.5: Mögliche Leistungskennwerte für Transporteinheiten [126], [250]	145
Tab. 11.6: Mögliche Sortiertiefen für Abbruch- und Aufbereitungsprozesse [33], [126], [249]	145
Tab. 11.7: Übersicht der verwendeten GaBi-Datensätze in der Modellierung mit GaBi 4	145
Tab. 11.8: Ausprägungen und Teilwirksamkeiten der Beispielszenarien	146
Tab. 11.9: Überschlägige Abbruchkosten nach LUBW [161]	147
Tab. 11.10: Überschlägige Aufbereitungskosten nach Herbst et al. [126]	147
Tab. 11.11: Überschlägige Transportkosten für Abbruchmaterialien	147
Tab. 11.12: Überschlägige Entsorgungskosten	148
Tab. 11.13: Überschlägige Erlöse	148

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AbfRRL	EU-Abfallrahmenrichtlinie
AP	Acidification Potential Versauerungspotential
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BRI	Brutto-Rauminhalt
DepV	Deponieverordnung
DGfM	Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau e.V.
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V.
DüMV	Düngemittelverordnung
EPD	Environmental Product Declaration, Umweltproduktdeklaration
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung
GK	Gesteinskörnung
GWP	Global Warming Potential, Globales Erwärmungspotenzial
Kap.	Kapitel
KEA	kumulierter Energieaufwand
KEV	kumulierter Energieverbrauch
KNA	Kosten-Nutzen-Analyse
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetz
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KS	Kalksandstein
KWA	Kosten-Wirksamkeitsanalyse
LB	Leichtbeton
LCA	Life Cycle Assessment
LCWE	Life Cycle Working Environment
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Max.	Maximierung
Min.	Minimierung
mKWA	Modifizierte Kosten-Wirksamkeitsanalyse
MZ	Mauerziegel
NB	Normalbeton
NP	Nutrition Potential, Eutrophierungspotenzial
NWA	Nutzwertanalyse
ODP	Ozone Depletion Potential, Ozonabbaupotenzial
PB	Porenbeton
PEI	Primärenergie
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential, Photooxidantienbildungspotenzial
RC	Recycling
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SFA	Stoffflussanalyse
Tab.	Tabelle
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
UNEP	United Nations Environment Programme

Symbolverzeichnis

Symbole zur mathematischen Formulierung der Zusammenhänge bei der Kosten-Wirksamkeitsanalyse in Kapitel 6 für die Lebensendphase von Mauerwerk:

W_{z_i}	Teilwirksamkeit eines Unterziels im Szenario i
$W_{z_{\min}}$	Teilwirksamkeit der minimal beobachteten Ausprägung eines Zielkriteriums
$W_{z_{\max}}$	Teilwirksamkeit der maximal beobachteten Ausprägung eines Zielkriteriums
z_i	Ausprägung eines Zielkriteriums im Szenario i
z_{\min}	minimal beobachtete Ausprägung eines Zielkriteriums in allen Szenarien
z_{\max}	maximal beobachtete Ausprägung eines Zielkriteriums in allen Szenarien
$W_{z_i}^*$	gewichtete Teilwirksamkeit eines Unterziels im Szenario i
G_z	Gewicht eines Unterziels in [%]
GW_i	Gesamtwirksamkeit des Szenarios i
$K_{\text{ges},i}$	Gesamtkosten des Szenarios i
$\sum K_{\text{aus},i}$	Summe der Ausgaben im Szenario i
$\sum K_{\text{ein},i}$	Summe der Einnahmen im Szenario i
GK_i	normierter Gesamtkostenwert des Szenarios i
$K_{\text{ges},i}$	Gesamtkosten des Szenarios i
$K_{\text{ges,max}}$	maximal errechnete Kosten in allen Szenarien
GKV_i	Gesamtwirksamkeit-Kosten-Verhältnis des Szenarios i

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Vor dem Hintergrund nachhaltigen Bauens hat sich in den letzten Jahren ein lebenszyklusorientiertes Denken im Bauwesen etabliert. Der Lebenszyklus von Bauwerken umfasst hierbei die Phasen Bereitstellung der Baustoffe, Erstellung und Nutzung des Bauwerks sowie dessen Entsorgung am Ende der Nutzungsphase (Lebensendphase, engl. end-of-life phase). Mit Blick auf die Nachhaltigkeit müssen bereits bei der Bauwerksplanung für die Erstellungs- und Nutzungsphase bestimmte Randbedingungen und Anforderungen an den Bauprozess sowie an die technische und die funktionale Qualität des Bauwerks beachtet werden. In diesem Zusammenhang sind ökologische, ökonomische und soziale Aspekte einzubeziehen [26]. Über die Erstellung und Nutzung eines Bauwerks hinaus hat auch die Lebensendphase Einfluss auf die Nachhaltigkeit des gesamten Bauwerks. Sie umfasst, wie in Abb. 1.1 dargestellt, den Abbruch des Bauwerks sowie die Aufbereitung und Anwendung der anfallenden Abbruchmassen oder rückgebauten Bauteile.

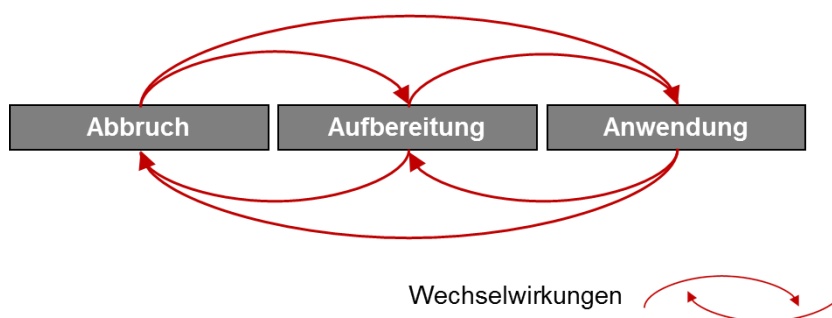


Abb. 1.1: Lebensendphase von Bauwerken

Die verschiedenen Abbruch- und Aufbereitungsaktivitäten zur Bereitstellung nutzbarer RC-Baustoffe sind je nach Qualitätsstufe mit gesundheits- und umweltbezogenen Auswirkungen sowie wirtschaftlichen Aufwendungen verbunden. Dazu zählen die Entnahme und der stoffliche bzw. energetische Verbrauch von Rohstoffen sowie die damit verbundenen Emissionen und Kosten. Die erzielte Materialqualität bestimmt letztlich den wirtschaftlichen Wert (Erlös) der RC-Baustoffe. Sorgfältig rückgebaute Mauersteine können erneut als Mauersteine verwendet werden, insbesondere im Bereich der Denkmalpflege. Aufbereitete Mauerwerksrestmassen können bei ausreichender Qualität wiederum als Ausgangsstoffe zur Herstellung neuer Mauersteine eingesetzt werden. Darüber hinaus ist eine Verwertung von Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch im Erd-, Straßen- und Wegebau, in der Vegetationstechnik sowie im Betonbau möglich. Für jeden Anwendungsbereich existieren eigene Anforderungsparameter an die Materialqualität mit teilweise eigenen Prüfverfahren. Die Materialqualität wird direkt durch die verwendeten Mauerwerkbaustoffe sowie den Abbruch und die Aufberei-

tung beeinflusst. Aus der jeweiligen Anwendungsoption ergeben sich definierte Anforderungen an die Materialqualität, die wiederum den notwendigen Grad der Aufbereitung für das Abbruchmaterial bestimmen. Die Abbruchmethode beeinflusst ihrerseits die Materialqualität des Ausgangsmaterials und damit ebenso den benötigten Aufbereitungsaufwand. Neben den Qualitätsanforderungen werden auch die einzelnen Fertigungsprozesse in den jeweiligen Anwendungsbereichen durch den Gebrauch von Recyclingbaustoffen (RC-Baustoffen, Sekundärbaustoffen) beeinflusst. So werden gegebenenfalls Rezepturanpassungen erforderlich oder die Einsatzmengen der RC-Baustoffe sind begrenzt.

Restmassen aus Neubau- und Abbruchmaßnahmen sowie Renovierungs-, Modernisierungs- und Sanierungsarbeiten nehmen einen großen Anteil des Gesamtabfallaufkommens in Deutschland ein. Als Teilstrom fallen dabei jährlich bis zu 10 Millionen Tonnen heterogen zusammengesetzter Mauerwerkrestmassen an [177]. Im Sinne der EU-Abfallrahmenrichtlinie [3], dem Kreislaufwirtschaftsgesetz [104] und der EU-Bauproduktenverordnung [96] sowie der damit verbundenen Nachhaltigkeitsdiskussion sind diese Restmassen einer möglichst hochwertigen Anwendung zuzuführen. Unter hochwertigen Recyclingprodukten werden im Allgemeinen solche Produkte verstanden, die mehr Aufbereitungsstufen durchlaufen haben, somit teurer sind, und/oder in einem Anwendungsbereich mit hohem Nutzen eingesetzt werden. Die Wertigkeit der Anwendung von RC-Baustoffen ist aber nicht allein an den Kosten eines Produktes und dem vermeintlichen Nutzen des neuen Anwendungsbereiches (z. B. Beton für ein Krankenhaus gegenüber Beton für ein Denkmal) festzumachen. Eine hochwertige Anwendung ist ebenso wenig mit höheren Anforderungen an die Materialqualität für den neuen Einsatzbereich des RC-Baustoffs zu verwechseln (z. B. Betonbau gegenüber Erdbau). Die Wertigkeit der Anwendung stellt vielmehr einen Summenwert aus einer Vielzahl einzelner Bewertungskriterien dar. Dies erfordert eine ganzheitliche Bewertung, das heißt eine gekoppelte Betrachtung der nachhaltigkeitsbezogenen Bewertungsdimensionen „Materialqualitäten“, „Mensch/Umwelt/Ressourcen“ und „Wirtschaftlichkeit“ (Abb. 1.2). Nur eine derart umfassende Bewertung kann die Grundlage für eine erfolgreiche Umsetzung der Nachhaltigkeitsforderungen der EU-Abfallrahmenrichtlinie [3], dem Kreislaufwirtschaftsgesetz [104] sowie der EU-Bauproduktenverordnung [96] bilden.

Derart umfassende Betrachtungen am Ende der Nutzungsphase von Mauerwerk erfolgten bislang noch nicht. Im Mauerwerkbau existieren zwar verschiedene Ansätze zur ganzheitlichen Erfassung und Optimierung der Nachhaltigkeitsaspekte Funktionalität, Ökonomie und Ökologie. Diese konzentrieren sich aber hauptsächlich auf die Herstellung und Nutzung der Mauerwerkbaustoffe. So kommen heute verschiedene Bauprodukte einzeln oder im Verbund zum Einsatz, deren Eigenschaften und Kombinationen im Wesentlichen unter den Gesichts-

punkten bauphysikalischer Anforderungen (z. B. Dämmeigenschaften) sowie wirtschaftlicher Fertigungstechniken (z. B. großformatige Mauerstein-Elemente) optimiert wurden. Die Anwendungsfähigkeit der Bauprodukte am Ende der Nutzungsphase des Mauerwerks war bisher allerdings nur von geringerer Bedeutung [179].

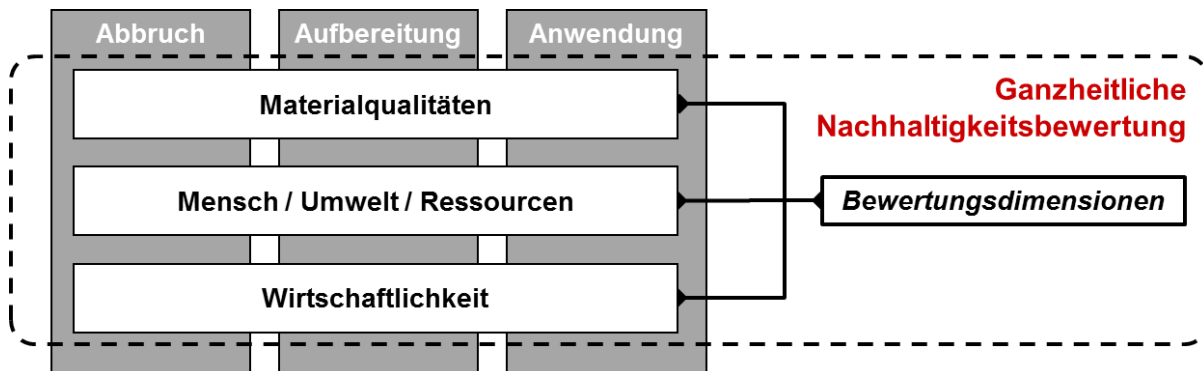


Abb. 1.2: Umfang einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung

Trotz vielfältiger Anwendungsmöglichkeiten und umfänglicher Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet beschränkten sich bisherige ökobilanzielle und ökonomische Betrachtungen im Wesentlichen auf eine Anwendung von RC-Baustoffen als rezyklierte Gesteinskörnungen für den Erd- und Straßenbau oder für die Betonproduktion. Außerdem wurden dabei hauptsächlich Kriterien zur Umweltverträglichkeit der RC-Baustoffe analysiert und bewertet. Die bautechnischen Eigenschaften flossen in solchen Fällen nur am Rande mit ein. Die meisten Arbeiten beziehen sich zudem auf den Gesamtstrom Bauschutt und nicht auf dessen Teilstrom Mauerwerkbruch. Verallgemeinernde Rückschlüsse auf das Ende der Nutzungsphase von Mauerwerkbaustoffen sind daraus jedoch nicht ohne weiteres möglich.

Insgesamt entsprechen die bisherigen Betrachtungen nicht dem Ansatz einer ganzheitlichen Bewertung. Letztlich fehlen dafür insbesondere strukturierte und strukturierende Informationen und Regelungen [193], [10]. Aus der beschriebenen Problemstellung leitet sich schließlich der Bedarf nach einem strukturierten Konzept zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung bereits bei der Planung von Abbruchprojekten im Mauerwerksbau ab. Hier setzt die vorliegende Arbeit an.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist die Bereitstellung eines multidimensionalen Bewertungskonzepts, das eine einzelfallbezogene, das heißt objektbezogene, Nachhaltigkeitsbewertung potenzieller Gestaltungsvarianten (alternative Szenarien, Handlungsalternativen) bei Abbruch und Aufbereitung von Mauerwerk bereits in der Planungsphase von Abbruchobjekten ermöglicht. Mit Hilfe praxisorientierter Bewertungskriterien soll für einzelne Szenarien jeweils der Grad ihrer

nachhaltigkeitsbezogenen Wertigkeit ermittelt werden. Dieser Grad erlaubt eine abschließende Reihung der Varianten. Damit soll möglichen Anwendern, wie Abbruch- und Recyclingunternehmen, Behörden sowie Forschungseinrichtungen, eine strukturierte und methodische Bewertungsgrundlage als Planungsinstrument für die zukünftige Umsetzung der EU-Abfallrahmenrichtlinie [3], des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [104] und der EU-Bauproduktenverordnung [96] gegeben werden. Gleichzeitig sollen die Anwender für bereits heute bestehende Gestaltungsvarianten bei Abbruch und Aufbereitung von Mauerwerk sowie für die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten für Mauerwerkbruch unterschiedlicher Materialzusammensetzung sensibilisiert werden.

Das eigene Bewertungskonzept wird in den nachfolgend beschriebenen Schritten erarbeitet:

- Grundlagenermittlung (Kap. 2 bis 5)
- Ableitung des eigenen Bewertungskonzepts (Kap. 6)
- Exemplarische Anwendung und Überprüfung der Anwendbarkeit des eigenen Bewertungskonzepts (Kap. 7)
- Abschließende Einschätzung des eigenen Bewertungskonzepts (Kap. 8)

Bei der **Grundlagenermittlung** ist zunächst ein allgemeiner Überblick zur Bedeutung der Bewirtschaftung von Baurestmassen sowie zu Mauerwerk und den verwendeten Baustoffen und deren Eigenschaften zu geben. Danach ist der Stand der Technik bei Abbruch von Mauerwerk, Aufbereitung von Mauerwerkbruch und Anwendung von RC-Baustoffen aus Mauerwerkbruch zu erfassen. Für die Anwendungsbereiche müssen die dazugehörigen Qualitätsanforderungen mit einbezogen werden. Über den Stand der Technik hinaus müssen methodische und analytische Grundlagen zur Bewertung von Prozessen und Produkten zusammengestellt und kritisch bewertet werden. Dazu gehört auch die Auswertung bisheriger Arbeiten zur Lebensendphase von Bauwerken und Bauprodukten.

Zur **Ableitung des eigenen Bewertungskonzepts** aus den beschriebenen Grundlagen sind der Untersuchungsgegenstand abzugrenzen sowie ein zielführender Bewertungsansatz, eine geeignete Analysemethode und erforderliche Analyseinstrumente zu identifizieren und auszuwählen. Darüber hinaus sind die Bewertungsschwerpunkte festzulegen. Für die ausgewählte Analysemethode sind Festlegungen und Annahmen bezogen auf den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk zu treffen. Zudem sind Bewertungskriterien festzulegen, die mit den ausgewählten Analyseinstrumenten zu bestimmen sind.

Zur **Demonstration der Anwendung und Überprüfung der Anwendbarkeit des Bewertungskonzepts** ist die Durchführung von Beispielbetrachtungen erforderlich, bei denen ver-

schiedene Gestaltungsvarianten für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk exemplarisch analysiert und bewertet werden. Die Gestaltungsvarianten werden dabei aus dem beschriebenen Stand der Technik abgeleitet. Entsprechend notwendiges Datenmaterial (z. B. Leistungskennwerte der verschiedenen Abbruch- und Aufbereitungsverfahren) ist zu recherchieren.

Zuletzt ist eine **abschließende Einschätzung des erarbeiteten Bewertungskonzepts** abzugeben. Zum einen sind die methodischen Grenzen des Konzepts und offen gebliebene Fragestellungen aufzuzeigen. Zum anderen sind in einem Ausblick mögliche Ansätze zur Beantwortung der offenen Fragen sowie die zukünftigen Einsatzmöglichkeiten des Konzepts darzulegen.

2 Bedeutung der Bewirtschaftung von Baurestmassen

Unsere Industriegesellschaft ist auf den ständigen Verbrauch stofflicher und energetischer Ressourcen angewiesen [140]. Dabei nimmt die Bauindustrie in der Gesamtwirtschaft Deutschlands trotz schwankender Bautätigkeit eine Schlüsselposition ein. Der Bausektor zählt zu den größten Verursachern von Stoffströmen in Deutschland. Zum einen ist das Bauen mit einem hohen Bedarf an materiellen und energetischen Ressourcen sowie finanziellen Aufwendungen verbunden. Zum anderen sind nahezu 50 Prozent des deutschen Abfallaufkommens dem Bausektor zuzurechnen [27], [231]. Einen Überblick über die verschiedenen Lebenswege mineralischer Baustoffe gibt Abb. 2.1. Hieraus ergeben sich für die Bewirtschaftung der anfallenden Baurestmassen die folgenden Möglichkeiten: Wieder- oder Weiterverwendung, Wieder- oder Weiterverwertung oder Beseitigung (Deponierung) [111], [240].

Bei einer Wiederverwendung wird der Baureststoff nach einer eventuell erforderlichen geringfügigen Aufarbeitung (z. B. Reinigung) ohne Veränderung seiner Gestalt in seiner ursprünglichen Funktion erneut eingesetzt – Beispiel: Mauerstein in der Denkmalpflege. Eine Weiterverwendung liegt vor, wenn der Baureststoff zwar ebenfalls nach einer geringen Aufarbeitung seine Gestalt beibehält, jedoch für einen neuen Zweck verwendet wird – Beispiel: Mauerziegel als Rasenbegrenzung. Bei einer Wiederverwertung (Recycling) wird die Gestalt des Reststoffs hingegen durch verschiedenartige technische Prozesse (z. B. Zerkleinern) aufgelöst. Nach dieser Aufbereitung wird der dabei gewonnene Stoff wieder in einen gleichartigen Herstellungsprozess zurückgeführt (recycelt, rezykliert), aus dem der Reststoff stammte – Beispiel: Ziegelmehl als Magerungsmittel bei der Ziegelherstellung. Bei der Weiterverwertung (Downcycling, Upcycling) erhält der aufbereitete Baureststoff dagegen eine andere Funktion als die des Ausgangsstoffs – Beispiel: Ziegel-Rezyklat als Zierkies. Eine Beseitigung von Restmassen durch Deponierung erfolgt erst dann, wenn die

Reststoffe keiner Verwertung mehr zugeführt werden können [111]. Im Rahmen dieser Arbeit wird übergreifend für Verwendung und Verwertung der Begriff Anwendung benutzt.

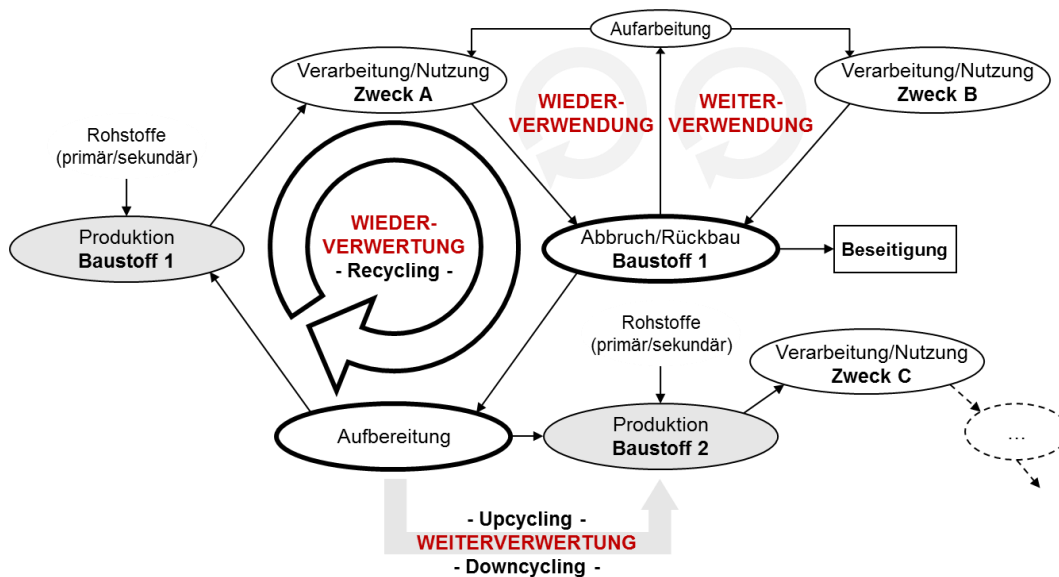


Abb. 2.1: Lebenswege mineralischer Baustoffe

Die Idee der Verwendung und Verwertung von Abbruchmaterialien ist nicht neu. Bereits im Altertum wurden Steine abgebrochener Bauwerke als günstiges Baumaterial für neue Bauten wiederverwendet. Die Beschaffung von Baustoffen war in früheren Zeiten aufgrund unzulänglicher Transportmöglichkeiten regional begrenzt. Es gab nahezu keinen überregionalen Baustoffhandel. Baumaterialien waren somit nicht ohne größere logistische und ökonomische Aufwendungen regional unabhängig verfügbar. Das frühe Wieder- und Weiterverwenden von Baustoffen und Bauteilen fand demnach weniger aus einem Umweltbewusstsein heraus als aus Nützlichkeits- und Wirtschaftlichkeitserwägungen statt. Mit Einführung der industriellen Produktion von Baustoffen und im Zuge der Entwicklung neuer Transportmittel vollzog sich ein Wandel zu einer überregionalen Verfügbarkeit und die ökonomische Komponente kehrte sich um. Es wurde billiger, neue Baustoffe zu produzieren, als alte wieder und weiter zu verwenden. Aus funktionierenden Stoffkreisläufen wurden offene Prozessketten [140], [153].

Die beschränkte Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen, die zunehmenden negativen Umweltauswirkungen durch Abbau und Verbrauch von Rohstoffen sowie die Verteuerung und Verknappung von Deponieraum führten jedoch in den letzten Jahren zu einem Umdenken in der Bau- und Abfallwirtschaft [111], [140], [237]. Im Februar 2012 trat das neue „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen“ (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG) [104] in Kraft und löste das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) [105] aus dem Jahre 1996 ab. Es dient der Umsetzung der EU-Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL) [3] von 2008 ins nationale Recht. Für Maß-

nahmen zur Vermeidung und zur Abfallbewirtschaftung wurde im KrWG [104] folgende Rangfolge festgelegt: 1. Vermeidung, 2. Vorbereitung zur Wiederverwendung, 3. Recycling (stoffliche Verwertung, keine Ersatzbrennstoff-Herstellung), 4. Sonstige Verwertung (insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung), 5. Beseitigung. Die festgelegte Rangfolge dient dem Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt sowie der Ressourcenschonung bei gleichzeitiger Berücksichtigung der technischen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Maßnahmen. Sie verlangt letztlich eine durchgehende Produktverantwortung und ein Wirtschaften in Stoffkreisläufen zur Vermeidung von Abfällen. Vor diesem Hintergrund gewinnt der Einsatz kreislaufgerechter Baustoffe und Baukonstruktionen sowie die nachhaltige Bewirtschaftung bzw. Kreislaufführung von Baurestmassen durch stoffliche Verwendung und Verwertung zunehmend an Bedeutung. Ebenso sind die Wiederverwendung ganzer Bauteile und die Umnutzung von Gebäuden mehr zu berücksichtigen [179]. Dies greift auch die EU-Bauproduktenverordnung (EU-BauPVO) [96] mit den im Anhang I formulierten Grundanforderungen an Bauwerke auf. Gemäß Punkt 7 "Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen" müssen Bauwerke so entworfen, errichtet, betrieben und rückgebaut werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden. Dies beinhaltet die Verwendung umweltverträglicher Primär- und Sekundärrohstoffe, die Dauerhaftigkeit der Bauwerke sowie die Wiederwendbarkeit bzw. Recyclingfähigkeit der verwendeten Baustoffe und Bauteile. Die betreffenden Auszüge aus dem KrWG [104], der AbfRRL [3] und der EU-BauPVO [96] sind im Anhang 11.1 zusammengestellt.

Die Verwendung oder Verwertung von Abbruchmaterialien und gebrauchten Bauteilen werden zur Sicherung einer nachhaltigen Kreislauf- und Bauwirtschaft allein jedoch nicht genügen. Die Prozesse des Bauwesens erfordern insgesamt eine Reduzierung der Material- und Energieeinträge sowohl bei der Herstellung als auch während und nach der Bauwerksnutzung. Nur in Kombination können im Sinne des KrWG [104] der Rohstoffeintrag und der Abfallaustrag in allen Lebensphasen eines Bauwerks gering gehalten werden [124], [119], [140], [27], [153], [24], [108], [8]. Aufgrund der vergleichsweise hohen durchschnittlichen Lebenserwartung von Bauwerken und Bauteilen werden viele der heute verbauten Stoffe erst in einigen Jahrzehnten als Abbruchmaterialien anfallen. Der Baubereich stellt somit ein großes „Zwischendepot“ dar. Er sollte dabei nicht als „temporäre Deponie“ für zukünftige Abfallmengen betrachtet werden, sondern als wichtige Ressource (Urban Mining) für zukünftige Baustoffe [140], [27], [108], [8].

3 Lebensendphase von Mauerwerk

3.1 Mauerwerk und verwendete Baustoffe

3.1.1 Allgemeines

Mauerwerk ist ein Massivbaustoff mit einer sehr langen historischen Tradition und Entwicklung. Er besteht aus anorganischen, nicht brennbaren Mauersteinen mit oder ohne Mauermörtel und Putzmörtel. Während seiner langen Entwicklungsgeschichte wurde der Mauerwerkbau immer wieder den wechselnden Anforderungen (Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Ästhetik) angepasst, beispielsweise in Form verbesserter Wärmedämmeigenschaften (Porenbetonsteine, Hochlochziegel) oder optimierter Fertigungstechniken (großformatige Planelemente). So entwickelte sich Mauerwerk in den letzten Jahrzehnten zu einem modernen, sehr leistungsfähigen und wirtschaftlichen Baustoff [41], [114], [22]. Im Zuge der aktuellen und zukünftigen Nachhaltigkeitsdiskussion muss er sich jedoch dem Wettbewerb mit anderen Materialien stellen. Beim Vergleich mit neueren Baustoffen und Bauweisen des 20. und 21. Jahrhunderts (z. B. Leichtbauweise mit Holz und/oder Faserverbundwerkstoffen) wird die Massivbauweise von Kritikern gelegentlich als nicht mehr zeitgemäß bezeichnet. Die Statistik belegt jedoch, dass Konstruktionen aus Mauerwerk insbesondere im Wohnungsbau weiterhin eine führende Marktstellung einnehmen. Abb. 3.1 gibt die Anteile der Konstruktionsarten an den 2010 in Deutschland genehmigten Wohnbauten wieder. Mit einem Anteil von 73 Prozent ist Mauerwerk der bedeutendste Wandbaustoff im Wohnungsbau. Mauerwerk erfüllt bei technisch hochwertiger Ausführung im hohen Maße die gestellten Anforderungen an Funktionalität und Nachhaltigkeit [114].

Aus Mauerwerk werden vorwiegend vertikale Tragglieder hergestellt, horizontale Tragglieder hingegen überwiegend aus Beton oder Stahl. Gängige Bauteile aus Mauerwerk sind ein- und zweischalige Außenwände, tragende und nichttragende Innenwände, Kellerwände, Haus-trennwände und Schornsteine [236]. Die Bemessung und Konstruktion von Mauerwerkbauten werden in der Normenreihe DIN EN 1996 [59] beschrieben. Hiernach dürfen grundsätzlich nur genormte Mauersteine und Mauermörtel verwendet werden. Für Baustoffe, die nicht den einschlägigen Normen entsprechen, muss auf geeignete Weise die Verwendbarkeit, z. B. durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) nachgewiesen werden.

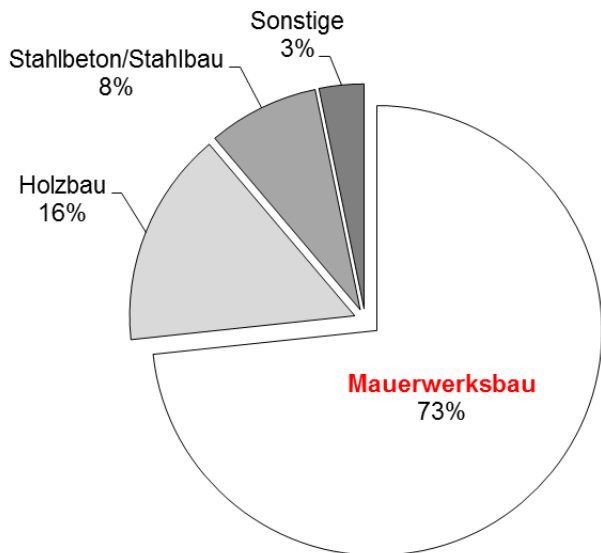


Abb. 3.1: Konstruktionsarten der 2010 in Deutschland genehmigten Wohnbauten [40]

3.1.2 Mauersteinarten

Grundsätzlich wird zwischen Natursteinen und künstlich hergestellten Mauersteinen unterschieden. Als Natursteine können alle in der Natur vorkommenden Gesteinsarten (z. B. Granit, Sandstein, Kalkstein, Tuff) verwendet werden, sofern sie über eine ausreichende Mindestdruckfestigkeit verfügen und keine Struktur- und Verwitterungsschäden aufweisen. Natursteinmauerwerk wird heute in Deutschland fast ausschließlich im Bereich von Sanierungs- und Restaurierungsmaßnahmen eingesetzt. Eine Ausnahme bildet der Einsatz für neue Fassaden und Bodenbeläge. Zum einen liegt dies an dem großen Herstellungsaufwand und den somit hohen Kosten. Zum anderen schränken die bauphysikalischen Eigenschaften von Natursteinen die Verwendung deutlich ein. Bei künstlich hergestellten Steinen lassen sich die Eigenschaften hingegen in einem weiten Bereich durch den Herstellungsvorgang variieren. Künstlich hergestellte Mauersteine werden in Mauerziegel, Kalksandsteine, Porenbetonsteine, Leicht- und Normalbetonsteine unterscheiden (Angabe in der Reihenfolge ihrer heutigen Marktanteile, Abb. 3.6). Darüber hinaus werden auch Hüttensteine künstlich hergestellt. Deren Marktanteil ist jedoch sehr gering. Einen Überblick über die Herstellung und die wesentlichen Eigenschaften der künstlich hergestellten Hauptmauersteinarten gibt Tab. 3.1. Sie unterscheiden sich zum einen in ihrer Herstellung (Rohstoffzusammensetzung, Formgebung, Härtung), und zum anderen variieren sie in ihren Abmessungen sowie den Rohdichte- und Festigkeitsklassen und somit den Wärmedämm- und Schallschutzeigenschaften. Außerdem unterscheiden sich die einzelnen Mauersteinarten teilweise stark hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens (Schwinden, Quellen, Kriechen) [41], [12], [191], [251].

3.1.3 Mauermörtel und Putz

Mörtel allgemein sind ein Gemisch aus Gesteinskörnungen, einem oder mehreren Bindemitteln und Wasser sowie gegebenenfalls Zusatzmitteln und Zusatzstoffen. Die Gesteinskörnung hat ein Größtkorn von 4 mm. Als Bindemittel kommen unter anderem Zement, Kalk oder Gips zum Einsatz [41], [12], [191].

Für Mauermörtel gelten die DIN EN 998-2 [66] sowie die DIN V 18580 [79]. Mauermörtel wird im Mauerwerk für die Herstellung der Lager-, Stoß- und Längsfugen verwendet. Dabei soll er die gleichmäßige Kraftübertragung von Stein zu Stein sicherstellen. Zudem dient er zum Ausgleich der Maßtoleranzen der Steine und schließt die Steinzwischenräume. Die Mörteldicken betragen bis zu 12 mm. Die Ausführung des Mauermörtels hat wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit sowie den Schall-, Brand- und Wärmeschutz des fertiggestellten Mauerwerks.

Putze sind Beläge, die an Wänden und Decken ein- oder mehrlagig in bestimmter Dicke aufgetragen werden und ihre endgültigen Eigenschaften erst durch Verfestigung am Baukörper erreichen. Die Anforderungen an Putze sind in der DIN V 18550 [78] und DIN 18550-1 [51] enthalten. Ihre Aufgaben bestehen in der Oberflächengestaltung von Bauwerken und der Erfüllung bauphysikalischer Eigenschaften. So dienen Putze zur Schaffung ebener und fluchtgerechter Sichtflächen oder als Untergrund für Anstriche, Tapeten und Beschichtungen. Bauphysikalische Aufgaben sind der Witterungs- und Feuchteschutz, der Wärmeschutz, der Schall- und Brandschutz sowie die Regulierung des Raumklimas. Zudem können Putze Anforderungen an die mechanische Beanspruchbarkeit bzw. Abriebfestigkeit und an eine erhöhte Strahlungsabsorption erfüllen. Es wird zwischen Putzmörteln auf Grundlage mineralischer Bindemittel und Beschichtungsstoffen basierend auf organischen Bindemitteln unterschieden. Putzmörtel sind in der DIN EN 998-1 [65] und der DIN EN 13279-1 [57] beschrieben. Sie werden in Dicken bis zu 20 mm aufgetragen. Beschichtungsstoffe bestehen aus Füllstoffen, Gesteinskörnungen und organischen Bindemitteln in Form von Dispersionen oder Lösungen [41], [191], [251].

3.1.4 Weitere Mauerwerkbaustoffe

Durch steigende Anforderungen an die bauphysikalischen Eigenschaften, wie der Wärmeleitfähigkeit, kommen gehäuft Mehr-Komponenten-Systeme unterschiedlichster Stoffkombinationen zum Einsatz [41], [22], [159]. So werden verschiedene Wärmedämmstoffe (z. B. Mineralwolle oder Polystyrol) als Wärmedämmverbundsystem außen auf das Mauerwerk auf- oder als integrierte Wärmedämmung in den Mauerstein eingebracht. Wärmedämmverbundsysteme bilden dabei eine Komponente der Oberflächenbeschichtung und sind stoff-

und/oder kraftschlüssig mit dem Mauerwerk verbunden. Die stoffschlüssige Verbindung erfolgt mittels Verklebung und die kraftschlüssige Verankerung mittels Dübeln. Integrierte Wärmedämmstoffe sind hingegen eine Komponente im Mauerstein, die als Kammerfüllung (in Hochloch- oder Blocksteinen) oder als Schichtenverbundwerkstoff vorliegt. Die Verbindung mit dem Mauerstein erfolgt auch hier stoff- und/oder kraftschlüssig. Während die stoffschlüssige Verbindung wieder durch eine Verklebung erzeugt wird, erfolgt die kraftschlüssige durch Zusammendrücken eines vorgeschneiten, elastischen Wärmedämmstoffs und dessen Einstecken in die dafür vorgesehenen Steinkammern [159]. Zusätzlich zu den Wärmedämmstoffen werden zum Witterungsschutz, aber auch aus ästhetisch gestalterischen Gründen, verschiedene Fassaden- bzw. Innenwandverkleidungen aus Kunststoff, Holz oder anderen Materialien aufgebracht. Hinzukommen Abdichtungssysteme zum Schutz vor Feuchte, wie Bitumen- und Polymerbitumenbahnen [41], [191].

3.2 Abbruch und Rückbau von Mauerwerk

Unter Abbruch wird die teilweise oder vollständige Beseitigung (Teil- oder Totalabbruch) von Bauwerken, konstruktiven Elementen technischer und/oder baulicher Anlagen oder derer Teile mit Zerstörung ihrer Funktionalität verstanden. Dies kann nach konventioneller oder selektiver Methode erfolgen [160]. Mögliche Vorarbeiten sind dabei die Demontage, Entkernung und Entrümpelung. Als Demontage wird das Trennen und Zerlegen von ganzen Bau- bzw. Anlagenteilen mit anschließendem Entfernen vom Standort verstanden. Bei der Entkernung werden am Bauwerk befestigte oder eingebaute Anlagen und Gegenstände beseitigt, die keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Bauwerks besitzen. Als Entrümpelung wird hingegen das Beseitigen nicht befestigter, ortsveränderlicher Materialien und Gegenstände bezeichnet [222], [146], [160].

Bei der Methode des **konventionellen Abbruchs** werden Bauwerke zumeist durch Zertrümmern ohne aufwändige Vorarbeiten in transportable Bestandteile zerlegt [160]. Dabei fällt ein heterogenes Gemisch aller Baustoffe an [134]. Beim **selektiven Abbruch** (auch als **kontrollierter Rückbau** bezeichnet) erfolgt wiederum ein material- und bauteilbezogenes Beseitigen von Bauwerken in bestimmten Demontagestufen [222], [144], [142], [198], [224]. Ziele des kontrollierten Rückbaus sind die Minimierung der anfallenden Stoffströme, die Verwendungs- oder Verwertungsmöglichkeit ganzer Bauteile sowie eine Verbesserung der Qualität der anfallenden Abbruchmaterialien und somit die Erhöhung ihres Anwendungspotentials. Ferner werden Störstoffe und schadstoffbelastete Anteile gezielt separiert. Durch die selektive Gewinnung der Stoffströme reduziert sich letztlich der Aufwand für die Aufbereitung des anfallenden Bauschutts [250], [247].

Tab. 3.1: Herstellung und wesentliche Eigenschaften der künstlich hergestellten Hauptmauersteinarten [41], [191], [251]

Mauersteinart	Mauerziegel	Kalksandstein	Porenbeton	Betonsteine	
				Leichtbetonsteine	Normalbetonsteine
Ausgangsstoffe	Ton, Lehm, Wasser, Zusätze	Kalk, Quarzsand, Wasser	Zement, Kalk, Quarzmehl, Porenbildner, Wasser	hydraulische Bindemittel, Gesteinskörnung, Wasser, Zusätze	
Formgebungsprozess	Strangpressen, Schneiden	Einzelsteinpressen	Schneiden	Rütteln in Einzelsteinform	
Härtungsprozess	Brennen (500°C bis 1.800°C)	Dampfdruckhärtung (160°C bis 220°C)	Dampfdruckhärtung (bis 200°C)	Lufthärtung	
Vollsteine (L ≤ 15 %)	X	X	-	X	X
Lochsteine (L > 15 %)	X	X	-	X	-
Voll-, Hohlblocksteine	-	X	-	X	X
Plansteine	X	X	X	X	X
Planelemente	-	X	X	-	-
Fasensteine	-	X	-	-	-
Bauplatten	(X)	X	X	-	-
Formsteine	X	X	-	-	-
Rohdichteklasse ^{*)} [kg/dm ³]	0,55 bis 2,4	0,6 bis 2,20	0,35 bis 1,0	0,45 bis 2,00	0,80 bis 2,4
Druckfestigkeitsklasse ^{*)} [N/mm ²]	2 bis 60	4 bis 60	2 bis 8	2 bis 20	2 bis 48
Wärmeleitfähigkeit ^{*) **)} [W/(m·K)]	0,19	0,50	0,10	0,14	0,24
Produktnorm	europäisch	EN 771-2 [60]	EN 771-4 [62]	EN 771-3 [61] EN 771-5 [63]	
	national	DIN 105-5 [44] DIN 105-6 [45] DIN 105-100 [43]	DIN V 4165-100 [79] DIN 4166 [53]	DIN 18148 [48] DIN V 18151-100 [74] DIN V 18152-100 [75]	DIN V 18153-100 [76]

*) abweichende Werte gemäß bauaufsichtlicher Zulassungen

**) Kleinstwert

L = Lochanteil

Der kontrollierte Rückbau ist zeitaufwändiger, während bei der konventionellen Vorgehensweise eine möglichst kurze Dauer der Abbruchmaßnahme im Vordergrund steht [250]. Die Umsetzung eines selektiven Abbruchs erfordert eine umfassende Bestandsaufnahme des Abbruchobjektes mit Erfassung der unterschiedlichen getrennt rückzubauenden Materialien und Bauteile. Grundsätzlich weisen aber durch selektive Abbruchmaßnahmen gewonnene Materialien deutlich höhere Qualitäten auf als Materialien aus dem konventionellen Abbruch. Dabei ergeben sich durch die Sortentrennung niedrigere Annahmepreise für das anfallende Material und gleichzeitig mehr Anwendungsmöglichkeiten. Neben einer Steigerung der Sortenreinheit fällt jedoch auch eine größere Menge zu entsorgender Materialien an, welche Schad- und Störstoffe in angereicherter Form enthalten [198], [224], [223], [199], [153]. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Vergleichsprojekten [150], [225], [198], [222], [144] zeigen, dass mit sorgfältiger Planung selektive Abbruchmaßnahmen auch kostengünstiger als konventionelle Abbrüche durchgeführt werden können. Ausschlaggebend für die Kosten sind dabei die Rahmenparameter des betreffenden Bauwerks und die örtlichen Bedingungen in Bezug auf die Möglichkeiten der Aufbereitung, Anwendung und Entsorgung sowie die Entsorgungs- und Produktpreise. Ebenso von großer Bedeutung sind die Transportentfernungen zu den jeweiligen Aufbereitungs- und Entsorgungseinrichtungen [250]. Der wirtschaftliche Vorteil durch einen kontrollierten Rückbau wird insgesamt durch reduzierte Kosten für Entsorgung (Deponierung) und Aufbereitung sowie gleichzeitig erhöhte Materialerlöse erzielt. Je größer die Differenz zwischen Entsorgung und Anwendung ist, desto größer wird der Spielraum für selektive Abbruchmaßnahmen [153].

Im Rahmen dieser Arbeit wird übergreifend für konventionellen Abbruch und kontrollierten Rückbau der allgemeine Begriff Abbruch verwendet.

Für den Abbruch stehen verschiedene praxiserprobte Verfahren und Technologien zur Verfügung. Aufgrund ihrer spezifischen Wirkungsweisen können sie in mechanische, thermische und hydraulische Verfahren unterteilt werden [189]. Bei mechanischen Verfahren werden durch statische und dynamische Belastungen Biegezug-, Zug- und Scherspannungen erzeugt, die das Bauwerk bzw. die Bauteile zerstören. Thermische Verfahren basieren auf dem Schmelzen von Baustoffen oder auf durch Wärmeleitung bzw. Strahlung verursachte Rissbildung. Bei hydraulischen Verfahren trifft ein Wasserstrahl, teilweise unter Beimischung abrasiver Stoffe, wie Quarzsand, mit hohem Druck auf das zu bearbeitende Bauteil und durchtrennt es oder fräst es ab [33], [236], [92].

Über die Wirkungsweise hinaus wird in Verfahrenstechniken zur reinen Auftrennung von Baustoffverbunden sowie in Trenntechniken für den selektiven Ausbau von Bauteilen unter-

schieden [236], [222]. In Tab. 3.2 sind die wichtigsten Abbruchverfahren und -technologien im Hochbau zusammengestellt. Die aufgeführten Verfahren können einzeln oder in Kombination angewendet werden [47]. Tab. 3.2 gibt Auskunft über die Eignung der verschiedenen Abbruchverfahren für Mauerwerk, Beton, Stahlbeton, Stahl und Holz.

Tab. 3.2: Abbruchverfahren und -technologien im Hochbau

Auftrennen von Baustoffverbunden	Selektiver Ausbau von Bauteilen
mechanisch	mechanisch
Abtragen Abgreifen Einschlagen Eindrücken Einreißen Einziehen Sprengen	Abtragen/Abgreifen Demontieren/Bergen Spalten Sägen Bohren Press- oder Scherschneiden
	thermisch
	Trennen durch direkte Erhitzung (Brennen) Trennen mit energiereicher Strahlung Trennen mit elektromagnetischer Energie
	hydraulisch
	Hochdruckwasser(sand)strahlen Wasserstrahlschneiden mit Impuls

Tab. 3.3: Eignung von Abbruchverfahren für verschiedene Baustoffe [160], [189], [236], [92]

Abbruchverfahren	Baustoff				
	Mauerwerk	Beton	Stahlbeton	Stahl	Holz
Abtragen	+	+	+	-	+
Abgreifen	+	0	-	-	+
Einschlagen	+	+	0	-	0
Eindrücken	+	+	0	-	+
Einreißen	+	+	+	+	+
Einziehen	+	+	+	+	+
Sprengen	+	+	+	+	-
Spalten	+	+	0	-	-
Demontieren/Bergen	-	-	+	+	+
Sägen	+	+	+	+	+
Bohren	+	+	+	+	+
Pressschneiden	+	+	+	-	-
Scherschneiden	-	-	-	+	-
Schneidbrennen	-	-	-	+	-
Sauerstoffkernlanzen	+	+	+	-	-
Metallpulverschneiden	+	+	+	+	-
Plasmaschneiden	-	-	-	+	-
Hochdruckwasser(sand)strahlen	+	+	+	0	-

(+) üblich, (o) möglich, ggf. mit Einschränkungen oder Zusatzmaßnahmen erforderlich, (-) nicht möglich oder üblich

Detaillierte Ausführungen zu den genannten Abbruchverfahren finden sich in der Fachliteratur [160], [1], [6], [147], [189], [222], [225], [236], [92], [252]. Nachfolgend werden die für Mauerwerk relevanten Verfahren in Übereinstimmung mit der Fachliteratur sowie der DIN 18007 [47] und der DIN 18459 [50] kurz beschrieben. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Abbruchverfahren sind in Tab. 3.4 zusammengestellt. Angaben zu Leistungskennwerten und Kosten der Verfahren erfolgen, soweit erforderlich, im Zusammenhang mit der Modellierung in Kap. 6 und Kap. 7.

Abtragen ist das schichtweise Zerkleinern von Bauteilen sowie das Entfernen von Schichten wie Putz, Estrich oder Fliesen vom Mauerwerk. Es erfolgt durch Schlagen, Hämmern, Stemmen mittels Meißeln oder auch durch Fräsen. Der Meißelvortrieb erfolgt durch elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch angetriebene Hämmer, die manuell oder maschinell (an einem Trägergerät wie einem Bagger) geführt werden. Abtragen ist ein in der Abbruchpraxis weit verbreitetes Verfahren, da die notwendigen Geräte bei vielen Unternehmen zur Verfügung stehen.

Als **Abgreifen** wird das teilweise oder vollständige Entfernen von Bauwerksteilen mit mechanischen oder hydraulischen Greifeinrichtungen (Greifer, Zangen, Scheren) verstanden. Die Greifeinrichtungen fassen das aus dem Verbund zu lösende Bauteil zangenförmig und heben es ab. Das zu lösende Bauteil darf nur eine lockere Verbindung mit anderen Bauteilen aufweisen, sonst muss es durch andere Verfahren aus dem Verbund gelöst werden. Das Abgreifen beim Abbruch von Mauerwerkbauten erfolgt durch Bagger mit entsprechenden Greifern.

Beim **Einschlagen** werden einzelne Bauteile mittels kinetischer Energie zertrümmert bzw. aus ihrem Verbund gelöst. Manuelles Einschlagen erfolgt mit Vorschlagshämmern und maschinelles durch an Seilen geführten Stahlkörpern (Fallbirne oder -kugel). Ihr Einsatz ist aber nicht mehr Stand der Technik.

Beim **Eindrücken** und **Einreißen** erfolgt der Abbruch durch Umlegen von Bauwerken oder Bauwerksteilen mittels Ein- bzw. Umdrücken oder Herausziehen von Segmenten. Dies kann manuell oder maschinell mit mechanisch oder hydraulisch geführten Druckwerkzeugen, teleskopierbaren Abbruchstielausrüstungen mit Reißzähnen oder hydraulischen Abbruchzangen erfolgen.

Einziehen ist das Umlegen von Bauwerken oder Bauteilen. Es kann manuell mit Seilwinden bzw. maschinell mit Seilzug oder Bagger mit geeigneten Abbruchauslegern erfolgen.

Beim **Sprengen** werden Bauwerke bzw. Bauteile teilweise oder vollständig zerteilt, zertrümmert oder zum Einsturz gebracht. Als Sprengmittel dienen Explosivstoffe, die mit elektrischen oder nicht-elektrischen Zündern zur Detonation gebracht werden und dadurch eine Druckwelle erzeugen. Die Sprengladungen werden als Bohrlochladungen oder als angelegte Ladungen angebracht. Es gibt verschiedene Sprengmethoden. Lockerungssprengungen dienen dem Auflockern von Bauteilen. Spalten durch Sprengen dient der Herstellung von Trennflächen in Bauteilen. Außerdem kann ein Umlegen von hohen, schlanken Bauwerken in eine vorbestimmte Fallrichtung durch Sprengen erfolgen. Durch das Sprengen tragender Teile kann das gesamte Gebäude zum Zusammenstürzen gebracht oder die Bauwerkshöhe, z. B. auf die Reichhöhe eines Baggers, niedergebracht werden.

Spalten ist das Zerkleinern von Bauteilen durch das Einleiten von Druckkräften mittels hydraulisch angetriebener Pressen oder Keile, die in vorher hergestellte Bohrungen eingesetzt werden. Alternativ kann ein Expansivstoff (Quellmittel) in die Bohrungen gefüllt werden, der in Verbindung mit Wasser eine Volumenzunahme erfährt. Der entstehende Quelldruck in den Bohrlöchern führt bei Überschreitung der Spaltzugfestigkeit zur Zerstörung des Bauteils.

Beim **Sägen** werden Bauteile mit Hand-, Scheiben-, Ketten- und Seilsägen voneinander abgetrennt. Die Ketten oder Sägeblätter sind mit scharfen Zähnen oder Diamantsegmenten versehen. Das Sägen kann als vorbereitende Maßnahme beim kontrollierten Rückbau eingesetzt werden.

Das **Bohren** dient zum Herstellen von Hohlräumen bzw. Heraustrennen von Bauteilen durch Kern- oder Vollbohrungen. Kernbohrungen werden durch einen mit diamanthaltigem Schneidbelag bestückten Hohlbohrer unter Kühl- und Spülwasserzugabe hergestellt. Vollbohrungen werden mittels üblicher Hartmetallbohrkronen ausgeführt. Mit den entsprechenden Bohraufsätzen lassen sich sowohl Mauerwerk und Beton als auch Stahl und Holz bohren. Das Bohren kann ebenfalls als vorbereitende Maßnahme beim kontrollierten Rückbau eingesetzt werden.

Pressschneiden ist das Zerkleinern bzw. Lösen einzelner Bauteile durch Zerpressen. Dabei werden zangenförmig angeordnete Backen hydraulisch zusammengedrückt und zerpressen das zwischen den Backen befindliche Bauteil. Das Verfahren kann beim Abbruch von Decken, Wänden, Unterzügen und Stützen aus Mauerwerk eingesetzt werden.

Das **Trennen durch direkte Erhitzung** ist für Mauerwerk durch den Einsatz von Sauerstoffkernlanzen und Metallpulverbrennern möglich. Das Prinzip des Sauerstoffkernlanzenverfahrens

rens besteht im Verbrennen von Eisenlanzen in einem unter Druck zugeführten Sauerstoffstrom. Beim Metallpulverschneiden wird wiederum einer Brenngas-Sauerstoff-Flamme ein Eisen-Aluminium-Pulvergemisch zugegeben.

Beim **Hochdruckwasserstrahlen** (HDWS) erfolgt das Zerlegen von Bauteilen oder Anlagenteilen mit einem Höchstdruckwasserstrahl, teilweise mit Beimengungen von abrasiven Stoffen (**Hochdruckwassersandstrahlen**). Zusätzlich kann das HDWS mittels eines **pulsierenden Wasserstrahls** erfolgen.

Tab. 3.4: Vor- und Nachteile der Abbruchverfahren [47], [222], [236], [92]

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Abtragen	<u>manuell:</u> <ul style="list-style-type: none"> • sehr hohe Materialselektion möglich • bei beengten Platzverhältnissen anwendbar • keine hohe Personalqualifikation notwendig • geringer Gerätebedarf • vorbereitend für andere Verfahren <u>maschinell:</u> <ul style="list-style-type: none"> • hohe Arbeitsgeschwindigkeit • weite Verbreitung der Geräte • vorbereitend für andere Verfahren • keine hohe Qualifikation des Personals notwendig 	<u>manuell:</u> <ul style="list-style-type: none"> • hoher Personaleinsatz • hoher Zeitaufwand • hohe physische Belastung für das Personal • erhöhte Unfallgefahr • Lärm, Staub <u>maschinell:</u> <ul style="list-style-type: none"> • geringere Materialselektion • Lärm, Staub, Erschütterungen • Arbeitsraum für Geräte erforderlich • geringe Reichweite der Trägergeräte • Unterbrechungen zum Laden notwendig
Abgreifen	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Beeinträchtigung der Tragwerksstabilität, daher Gefahr von Einstürzen gering • schneller Arbeitsfortschritt bei Mauerwerk und Holzbauten • Abbruch und Laden mit einem Gerät in einem Arbeitsgang • geringe Erschütterungen • geringe Gefahr durch herabfallende Teile 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Personal- und Geräteeinsatz • erhöhter Platzbedarf • hoher Verschleiß an Zangen und Scheren • keine massigen Bauteile abgreifbar • verstärkte Bewehrung separat durchzutrennen • Lärm, Staub • mögliche Beschädigung des zu lösenden Bauteils beim Abgreifen
Einschlagen	<ul style="list-style-type: none"> • geringer Personal- und Geräteeinsatz • hohe durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit • niedrige durchschnittliche Kosten • Abbrechen und Laden mit gleichem Arbeitsgerät möglich bei Werkzeugwechsel • schneller Geräteaufbau 	<ul style="list-style-type: none"> • keine Materialselektion möglich • Lärm, Staub, Erschütterungen • erhöhter Platzbedarf • große und schwere Arbeitsgeräte • Unterbrechungen durch Schuttbeseitigung • geringe Kontrollmöglichkeiten • nicht für Teilabbrüche geeignet • Nachzerkleinern großer Bruchstücke nötig
Eindrücken	<ul style="list-style-type: none"> • geringer Personal- und Geräteeinsatz • hohe durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit • niedrige durchschnittliche Kosten • Abbruch und Laden mit einem Gerät in einem Arbeitsgang 	<ul style="list-style-type: none"> • Lärm, Staub, Erschütterungen • begrenzte Kontrollmöglichkeiten • begrenzte Reichhöhe • nur geringe Materialselektion • Beeinträchtigung der Tragwerksstabilität, daher Begehen der Gebäudes nach Abbruchbeginn nicht mehr möglich

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite.

Tab. 3.4: Vor- und Nachteile der Abbruchverfahren [47], [222], [236], [92] (Fortsetzung)

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Einreißen	<ul style="list-style-type: none"> • geringer Personal- und Geräteeinsatz • hohe durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit • niedrige durchschnittliche Kosten • Abbruch und Laden mit einem Gerät in einem Arbeitsgang 	<ul style="list-style-type: none"> • Lärm, Staub, Erschütterungen • begrenzte Kontrollmöglichkeiten • begrenzte Reichhöhe (ca. 15 m) • teilweise Nachzerkleinerung erforderlich • großer Arbeitsraum
Einziehen	<ul style="list-style-type: none"> • hohe durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit und -produktivität • niedrige durchschnittliche Kosten • bei Einsatz von Minibaggern gute Materialelektion möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Lärm, Staub, Erschütterungen • begrenzte Kontrollmöglichkeiten • begrenzte Reichhöhe (ca. 25 m) • hoher Arbeitsaufwand durch Anlegen der Zugseile • starker Verschleiß der Zugseile durch herabfallenden Bauschutt
Sprengen	<ul style="list-style-type: none"> • hohe durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit und -produktivität • niedrige durchschnittliche Kosten • Zerstörung unabhängig vom Material 	<ul style="list-style-type: none"> • keine Materialelektion möglich • Lärm, Staub, Erschütterungen • großer Sicherheitsabstand
Spalten	<ul style="list-style-type: none"> • leise, staubfrei, erschütterungsarm • sehr viele Varianten möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • langsam • hohe durchschnittliche Kosten bei geringer durchschnittlicher Leistung • sehr hohe Abhängigkeit von Bauteildicke
Sägen	<ul style="list-style-type: none"> • erschütterungsfrei • hohe Genauigkeit • flexibel einsetzbar durch kleine leichte Geräte • vorbereitend für andere Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Lärm • langsame durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit • ggf. Kühlwassereinsatz
Bohren	<ul style="list-style-type: none"> • erschütterungsfrei, geringe Staubbelastung (ggf. Absaugung) • hohe Genauigkeit • vorbereitend für andere Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Lärm • ggf. Kühlwassereinsatz • sehr hohe durchschnittliche Kosten • geringe Leistung bei hoher Abhängigkeit von Materialhärte
Press-schneiden	<ul style="list-style-type: none"> • leise, erschütterungsarm • Materialzerkleinerung erspart Brecher • geringe Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> • langsam • Gefahr durch herabfallende Bauteile • separates Laden erforderlich
Hochdruck-wasser(sand)-strahlen	<ul style="list-style-type: none"> • horizontal und vertikal anwendbar • leise, erschütterungsfrei • geringer Energiebedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Wasserbedarf • Anfall von Abrasivstoffen • Gefahr von Wasserschäden • starker Verschleiß der Strahldüse
Wasserstrahl-schneiden mit Impuls	<ul style="list-style-type: none"> • horizontal und vertikal anwendbar • leise, erschütterungsfrei • geringer Energiebedarf • kein Anfall von Abrasivstoffen • Wasserbedarf geringer 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Wasserbedarf • Anfall von Abrasivstoffen • Gefahr von Wasserschäden • starker Verschleiß der Strahldüse • Bewehrungsstahl schlechter trennbar

3.3 Aufbereitung von Mauerwerkbruch

3.3.1 Allgemeines

Zur Herstellung hochwertiger Recyclingbaustoffe aus Mauerwerkbruch bedarf das Abbruchmaterial in Abhängigkeit der vorhandenen und der zur Anwendung erforderlichen Materialqualität einer gezielten Aufbereitung. Die Aufbereitung hat die Aufgabe, aus dem vorliegenden Abbruchmaterial einen RC-Baustoff mit definierten Eigenschaften zu erzeugen, die den technischen Anforderungen für das jeweilige Anwendungsgebiet entsprechen müssen. Dies

betrifft die Korngrößenzusammensetzung, die Stoffzusammensetzung und bestimmte chemische und physikalische Merkmale. Darüber hinaus müssen RC-Baustoffe strenge Anforderungen zur Umweltverträglichkeit erfüllen [169], [173], [182].

3.3.2 Aufbereitungsverfahren und -technologien

Für die Aufbereitung von Abbruchmaterialien stehen verschiedene praxiserprobte Verfahren und Technologien zur Verfügung. Sie haben meist ihren Ursprung in der Aufbereitung mineralischer Rohstoffe [173], [183], [249]. Die zum Einsatz kommenden Anlagenkomponenten lassen sich funktionell in primäre bis tertiäre Aggregate und Zusatzeinrichtungen gliedern [183]. In Tab. 3.5 ist eine Auswahl eingesetzter Aufbereitungsaggregate zusammengestellt. Sie werden im Folgenden kurz erläutert. Angaben zu Leistungskennwerten und Kosten erfolgen, soweit erforderlich, im Zusammenhang mit der Modellierung in Kap. 6 und Kap. 7. Detaillierte Ausführungen zu einzelnen Aufbereitungsaggregaten finden sich in [18], [21], [83], [145], [258], [106], [38], [81], [82], [52].

Primäre Aggregate gewährleisten die Ausführung der Grundaufbereitungsstufen Zerkleinern und Aufschließen, Klassieren sowie Sortieren. Die Ziele der Grundoperationen sind in Tab. 3.6 zusammengefasst. Primäraggregate verändern direkt die eingehenden Materialströme [183]. Beim Zerkleinern kommen unterschiedliche Brecher zum Einsatz, die sich für eine Zerkleinerung im Bereich mittelharter und harter Gesteine eignen, zu denen auch Mauerwerkbruch zugeordnet wird [17]. Das Klassieren erfolgt in Siebmaschinen mittels fester oder beweglicher Roste mit vorgegebenen Maschenweiten. Dabei können die Phasen Vorabsiebung und Nachsiebung (Produktsiebung) unterschieden werden. Bei der Vorabsiebung wird das noch ungebrochene Abbruchmaterial in eine Fein- und Mittelkörnung sowie noch zu brechendes Material getrennt. Bei der Produktsiebung erfolgt die Fraktionierung des gebrochenen Materials in anwendungsgerechte Körnungen. Für das Sortieren stehen verschiedene Verfahren mit unterschiedlicher Leistungsfähigkeit zur Verfügung. Die Sortierverfahren werden nach den genutzten physikalischen Eigenschaften sowie nach trockenen und nassen Verfahren klassifiziert [250], [17], [222], [33]. In Tab. 3.7 sind die in der Bauschutttaufbereitung angewandten Trocken- und Nasssortierverfahren zusammengestellt. Im Allgemeinen erzielt die Nasssortierung in Hinsicht auf die Produktqualität höhere Leistungen als die Trockensortierung. Trotzdem haben sich in der Praxis die Trockenverfahren durchgesetzt. Hauptgrund dafür sind die Kosten, die durch die Aufbereitung des Kreislaufwassers bzw. die Abwasserreinigung bei den Nassverfahren anfallen [33]. In Tab. 3.8 sind die Vor- und Nachteile der Trocken- und Nassverfahren gegenübergestellt.

Sekundäre Aggregate unterstützen die primären Aggregate in ihrer Funktion. Sie werden zum Dosieren, Fördern und Abziehen der Materialien und Hilfsstoffe sowie zum Abscheiden

störender Bestandteile eingesetzt. Dazu zählen auch Anlagen zur Produktentwässerung und Abwasseraufbereitung. **Tertiäre Aggregate** dienen der Materialaufgabe, dem Materialtransport innerhalb der Anlage, dem Mischen sowie der Lagerung der Aufgabematerialien, End- und Zwischenprodukte sowie Reststoffe. Sie sichern damit den Materialfluss in der Anlage, verändern jedoch nicht die stofflichen Eigenschaften der Materialien. **Zusatzeinrichtungen** werden als Maßnahmen zum Arbeits- und Umweltschutz durch Minderung von Lärm- und Staubemissionen und Verschmutzungen, aber auch als Hilfsmittel zur Ablauforganisation auf der Anlage eingesetzt. Sie sind meist schon aus genehmigungsrechtlichen Gründen erforderlich. Sie können gleichzeitig verschleißmindernd wirken [183].

Tab. 3.5: Auswahl eingesetzter Aufbereitungsaggregate [250], [126], [183], [33], [145], [239]

Funktion		Aggregate
Primäre Aggregate		
Zerkleinern der Aufgabematerialien und Zwischenprodukte		Backenbrecher, Prallbrecher, Schlagwalzenbrecher, Kegelbrecher, Schallimpulsverfahren
Klassieren der Aufgabematerialien und Zwischenprodukte		Schwingsiebmaschinen, Rotationssiebmaschinen
Sortieren der Aufgabematerialien und Zwischenprodukte		Handauslesestation, Magnetscheider, Hydrobandabscheider, Setzmaschine, Windsichter, Siebmaschinen mit Störstoffausblasung
Sekundäre Aggregate		
Dosieren, Fördern, Abziehen der Aufgabematerialien, End- und Zwischenprodukte sowie Reststoffe		Plattenbänder, Schwingförderrinnen, Förderbänder, Stufen- und Rollenroste
Entwässerung der Endprodukte		Entwässerungssieb, Hydrozyklon, Entwässerungsrutsche
Dosieren der Hilfsstoffe (z. B. Wasser)		Pumpen, Gebläse
Aufbereitung der Hilfsstoffe (z. B. Wasser)		Kläranlage
Tertiäre Aggregate		
Materialaufgabe (Beschickung von Aufgabebunker und Dosiereinrichtungen)		Radlader, Hydraulikbagger
Lagern der Aufgabematerialien, End- und Zwischenprodukte sowie Reststoffe; Mischen der Endprodukte		Aufgabebunker, Container, Halden, Silos, Mischbänder, Tellerischer
Fördern der Aufgabematerialien, End- und Zwischenprodukte sowie Reststoffe		Förderbänder, Schwingförderrinnen
Zusatzeinrichtungen		
Arbeits- und Umweltschutz	Lärm- und Staubschutz	Einhausung Gesamtanlage, Lärm- und Staubschutzkabine
	Staubvermeidung und Entstaubung	Abdeckung der Förder- und Klassieraggregate, Staubabsaug- oder Feuchtnebelanlagen
	Lärm- und Verschleißschutz	Gummi- und Verschleißschutz für Bunker, Siebbeläge aus Gummi oder Polyurethan, Lärmschutzwälle
Hilfsmittel der Ablauforganisation der Anlage		Büro- und Sozialräume, Bürotechnik, Werkstätten, Energieversorgung, Lager für Hilfs- und Betriebsstoffe, Wiegestation, Überwachungs- und Steuerungseinrichtungen

Tab. 3.6: Grundoperationen der Bauschuttaufbereitung und deren Ziele [173], [183], [239]

Grundoperationen	Ziele
Zerkleinern und Aufschließen: Zerteilen eines Festkörpers durch Einwirken mechanischer Kräfte bis zum Bruch	<ul style="list-style-type: none"> • Herabsetzen der oberen Korngröße • Erzeugen bestimmter Korngrößenverteilungen • Aufschließen von Einzelkomponenten aus Stoffverbunden
Klassieren: Trennung eines körnigen Haufwerks nach geometrischen Abmessungen in Kornfraktionen	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenzen der oberen Korngröße • Erzeugen bestimmter Korngrößenverteilungen für die nachfolgende Anwendung der RC-Baustoffe • Abtrennen von Grobanteilen zum Schutz nachgeschalteter Brecher vor Überlastung und Beschädigung • Abtrennen von Feianteilen zur Entlastung von Zerkleinerungsanlagen, zum Schutz vor Verschleiß und Vermeiden von Verstopfungen • Vorbereiten der Sortierung, wenn diese nur bei engem Körnungsband möglich ist • ggf. Trennen, wenn in bestimmten Kornfraktionen bestimmte Stoffe angereichert sind
Sortieren: Trennen eines Materialgemisches nach Stoffarten unter Nutzung physikalischer Merkmale	<ul style="list-style-type: none"> • Entfernen von Fremd- und Störstoffen zum Schutz nachgeschalteter Anlagenkomponenten und zur Steigerung der anwendungsbezogenen Materialqualitäten der RC-Baustoffe • Trennen gemischter Abbruchmaterialien in ihre mineralischen Bestandteile

Tab. 3.7: Trocken- und Nasssortierverfahren [250]

Trockenverfahren	Nassverfahren
Dichtesortierung <ul style="list-style-type: none"> • Windsichtung 	Dichtesortierung <ul style="list-style-type: none"> • Schwimm-Sink-Sortierung • Schwerkraftsortierung • Filmschichtsortierung • Aufstromsortierung • Setzsortierung
Sortierung in Magnetfeldern <ul style="list-style-type: none"> • Magnetscheidung 	
Trennung nach optischen Eigenschaften <ul style="list-style-type: none"> • Klauben • Optoelektronische Sortierung 	
Sortierung nach mechanischen Eigenschaften <ul style="list-style-type: none"> • Selektive Zerkleinerung mit nachfolgender Klassierung durch Sieben 	

Tab. 3.8: Vor- und Nachteile der Trocken- und Nasssortierv Verfahren [250], [33], [126]

Trockensortierung		Nasssortierung	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Nichtanfallen von Schlämmen • keine Wasserreinigung bzw. -aufbereitung notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> • Korngrößenabhängigkeit • Trennleistung abhängig von der Qualität des Materials • Staubentwicklung • zur Verwendung im Straßenbau muss das Produkt angefeuchtet werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Entfernung auswaschbarer Schad- und Störstoffe • mineralische Fraktion bis zu 99 % frei von Leichtstoffen • hochwertiges Recycling möglich • optimaler Wassergehalt (9-10 %) im mineralischen Material • geringe Staubentwicklung • weniger korngrößenabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten durch Wasserverbrauch • Kosten durch die Entsorgung des Schlammes aus der Kreislaufwasseraufbereitung • extreme Schaumbildung • Verstopfung der Düsen • Anfälligkeit der Feststoffpumpen

3.3.3 Anlagentypen und -konfigurationen

Anlagen zur Bauschuttauflbereitung setzen sich baukastenartig aus den oben beschriebenen Einzelaggregaten zusammen. Dabei lassen sich Aufbereitungsanlagen im Wesentlichen durch ihre Mobilität und Stufigkeit der Zerkleinerung (Anzahl der eingesetzten Brecher) unterscheiden [183], [222].

Es werden **mobile, semimobile und stationäre Anlagen** unterschieden. Die Komplexität des Anlagenaufbaus ist bei stationären Anlagen am größten. Mobile Anlagen sind gegenüber stationären Anlagen vergleichsweise einfach aufgebaut. Sie können mit Hilfe von Sattelschleppern oder Anhängern zu verschiedenen Standorten transportiert werden. Auch selbstfahrende Anlagen mit Rad- oder Raupenfahrwerk sind möglich. Mobile Anlagen arbeiten meist nach dem gleichen Verfahrensprinzip: Aufgabe, Vorsiebung, Zerkleinern, Magnetscheidung und Nachsiebung. Sie werden eingesetzt, wenn bei einer Abbruchmaßnahme zeitlich begrenzt größere Mengen Abbruchmaterial anfallen, die vor Ort als RC-Material eingesetzt werden können, und die Platzverhältnisse das Aufstellen einer solchen Anlage gestatten. Anspruchsvollere Technologien für die Aufbereitung von Abbruchmaterialien lassen sich in stationären Anlagen verwirklichen. Hierbei können zusätzliche Aufbereitungsschritte durchlaufen werden. Dazu gehören eine zweite Brecherstufe und ein umfangreicheres Aus-sortieren von Stör- und Fremdstoffen mittels Leseband, Windsichter oder Nasswäsche. Stationäre Anlagen werden mit einem Lager zur Bevorratung der Input- und Output-Materialströme fest errichtet. Sie zeichnen sich gegenüber mobilen und semimobilen Anlagen durch höhere Durchsätze und letztlich durch eine höhere Produktqualität aus. Sie erlau-

ben die Herstellung verschiedener Körnungen und Korngemische [169], [126], [183], [249], [222], [92], [130]. Ihr Einsatz ist nach [117] bei Abbruchmengen von über 100.000 Tonnen im Jahr vorteilhaft. Stationäre Anlagen werden heute für Anlagenleistungen bis zu ca. 300 Tonnen pro Stunde ausgelegt [126]. Semimobile Anlagen gleichen wegen des umfangreichen Technikeinsatzes wiederum stationären Anlagen. Sie bestehen aus transportfähigen Einheiten und sind im Gegensatz zu mobilen Anlagen auf Stahlgerüste montiert, die im Allgemeinen mit Kufen ausgestattet sind. Semimobile Anlagen können aufgrund ihrer modularen Bauweise an andere Standorte verlegt werden. Zum Versetzen der Anlage werden die Einzelaggregate demontiert und auf Sattelaufleger verladen. Semimobile Anlagen weisen meist größere Kapazitäten auf als mobile Anlagen [169], [250], [183], [249], [222], [92], [130]. Es sind Durchsatzleistungen bis zu 200 Tonnen pro Stunde möglich [106]. Der Transport ist jedoch vergleichsweise aufwändig. Semimobile Anlagen spielen daher in der Praxis eine untergeordnete Rolle [250]. Zusammenfassend sind in Tab. 3.9 die Vor- und Nachteile mobiler und stationärer Aufbereitungsanlagen gegenübergestellt.

Im Jahr 2010 waren in Deutschland 2.073 Anlagen zur Aufbereitung von Bauschutt im Einsatz - davon 1.327 mobile sowie 746 stationäre und semimobile Anlagen. Die in mobilen Anlagen verarbeitete Menge an Bauabfall betrug rund 33 Millionen Tonnen im Jahr. Bei einer möglichen Kapazität von ca. 74 Millionen Tonnen wurden in stationären und semimobilen Anlagen etwa 30 Tonnen im Jahr aufbereitet [2]. Die Anlagenauslastung ist in den letzten Jahren laut Aussagen der Anlagenbetreiber ständig gesunken [126].

Tab. 3.9: Vor- und Nachteile mobiler und stationärer Aufbereitungsanlagen [83], [17], [222], [33]

Vorteile	Nachteile
Mobile Anlagen	
<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilität und Mobilität des Einsatzes • geringe Transportkosten für Bauschutt bei Wiederverwertung vor Ort • wirtschaftlich bei kleinen Materialmengen • geringere Investitionskosten, kein Grundstückserwerb nötig 	<ul style="list-style-type: none"> • meist nur ein bis zwei Produkte möglich • geringere Produktqualität • Umweltbelastung durch Lärm und Staub • hohe Betriebskosten für An- und Abtransport, Auf- und Abbau der Anlage
Stationäre Anlagen	
<ul style="list-style-type: none"> • individuelle Anpassung des Anlagenkonzeptes • bessere Produktqualität möglich • größere Zwischenlagerflächen möglich • Zwischenlagerung bei Absatzstockungen • keine Umsetzkosten • verminderte Umweltbelastung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte für Anlieferung • Wirtschaftlichkeit abhängig von der Versorgung mit Abbruchmaterial • genehmigungsrechtlich aufwendig • hohe Investitionen, Grundstück notwendig • hoher Platzbedarf für die Lagerung der Endprodukte

Die Anzahl der Brechstufen und die Art der eingesetzten Brecher bestimmen das erreichbare Zerkleinerungsverhältnis und steuern somit die erzielbaren Sieblinien der Produktkörnungen. Es wird nach **ein- und zweistufigen Verfahren** unterschieden. Mehr als zwei Brechstufen kommen bei der Bauschuttaufbereitung nicht zum Einsatz [183], [222]. In Abb. 3.2 ist das Beispiel einer einstufigen mobilen Aufbereitungsanlage als Fließbild dargestellt. Das aus dem Abbruch stammende Rohmaterial wird in den Aufgabebunker per Radlader oder Schaufelbagger aufgegeben und dem Prallbrecher zugeführt. Ein Überbandmagnet entfernt Eisenschrottanteile. Danach erfolgt eine Absiebung, die das Größtkorn des hergestellten Produktes entsprechend begrenzt. Im Beispiel erfolgt die Absiebung bei 45 mm. Das Produkt 0/45 mm kann bis zur Verarbeitung zwischengelagert werden. Das Überkorn-Material 45/X mm kann entweder aufgehaldet oder wieder dem Brecher zugeführt werden. Andere mobile Verfahrenskonzepte enthalten die Möglichkeit zur Vorabsiebung oder in Ausnahmefällen auch zur Windsichtung [169], [249], [222], [126]. Beispiele für eine einstufige und zweistufige stationäre Aufbereitungsanlage sind in Abb. 3.3 und Abb. 3.4 dargestellt. Über das Vorsieb werden feinkörnigere Bestandteile vom zu brechenden Gut (z. B. 0/45 mm oder 0/56 mm) abgetrennt. Dadurch wird der nachgeschaltete Brecher entlastet. Zudem können bei Mauerwerk größere Mörtel- und Putzanteile abgetrennt werden. Eisenschrottanteile werden per Überbandmagnet an verschiedenen Stellen im Verfahrensverlauf abgetrennt. Über Lesebänder können per Klaubung grobe Störstoffe, wie Holz, Papier, Pappe und Kunststoffe entfernt und getrennt verwertet werden. Ein weiteres Auftrennen der Vorabsiebmaterials, z. B. in die Körnungen 0/5 mm und 5/45 mm, kann durch den Einsatz von Zwischensieben erfolgen. Die entstehenden Körnungen können dem Verfahrensfluss nach dem Brecher wieder zugeführt oder getrennt aufgehaldet und als RC-Baustoff eingesetzt werden. Im Brecher erfolgt die Zerkleinerung des Materials 45/X mm bzw. 56/X mm. Durch eine zweite Brechstufe verbessern sich die bautechnischen Eigenschaften der zu produzierenden RC-Baustoffe, wie Kornform und Kornfestigkeit. Nach dem letzten Brechvorgang erfolgt in einer Siebanlage die Klassierung des gebrochenen Materials in die vorgesehenen Produktkörnungen. Die Einzelkörnungen können noch einem Windsichter zugeführt werden. Hier werden mittels Aerosortierung kleinere Partikel aus Holz, Papier, Pappe, Kunststoffen und Porenbeton entfernt. Die so gereinigten Körnungen werden danach getrennt aufgehaldet und eingesetzt oder über Silos und Mischbänder zu verschiedenen Mineralstoffgemischen zusammengeführt [169], [126], [249], [222].

Die Wahl der Anlagentechnik und -konfiguration hängt einerseits von den Produkthanforderungen ab, die wiederum von den gesetzlichen und technischen Regelungen sowie ihrem Marktwert bestimmt werden. Andererseits wird die Wahl von der Menge, Art und Beschaffenheit der Abbruchmaterialien im Einzugsgebiet der Anlage sowie von den örtlichen Gege-

benheiten, wie zur Verfügung stehender Platz, Verkehrsanbindung, Umwelt- und Anliegerbelange, bestimmt [182]. Die Gewinnung von RC-Baustoffen aus sortenreinem und stör- und fremdstoffarmem Abbruchmaterial ist deutlich weniger aufwändig als die Aufbereitung heterogenen Abbruchmaterials. Darüber hinaus ist das Preisniveau für Gesteinskörnungen zur Baustoffherstellung vergleichsweise niedrig. Deshalb müssen die gewählten Aufbereitungsverfahren möglichst kostengünstig zu betreiben sein. Aus diesem Grund werden ein niedriger Energieverbrauch, ein geringer Wartungsaufwand und vor allem eine einfache und robuste Betriebsweise mit möglichst geringem Personalaufwand angestrebt [250]. Nach [183] kommen in Regionen hoher Entsorgungskosten und geringer Produkterlöse überwiegend einstufige Anlagen ohne Störstoffabscheidung zum Einsatz. Die Aufbereitung erfolgt dabei mit dem Ziel, zu entsorgende Stoffströme zu vermeiden. In solchen Regionen sind zweistufige Anlagen mit Windsichtung und Leseband lediglich zur Aufbereitung von störstoffreichen Materialien besser. Es werden insgesamt Verwertungsquoten bis zu 100 Prozent bei entsprechendem Einsatz als Ver- und Hinterfüllungsmaterial oder bestenfalls als Tragschicht im Straßenbau erreicht. In Regionen mit wiederum hohen Produkterlösen und geringen Entsorgungskosten dominieren stets zweistufige über einstufige Anlagen. Die Aufbereitung erfolgt hier qualitätsorientiert. Dabei werden mittlere relative Produktqualitäten für den Einsatz in Tragschichten, aber auch als Gesteinskörnung für Beton erreicht. Die Verwertungsquoten liegen zugunsten höherer Produktqualitäten zwischen 95 und 98 Prozent.

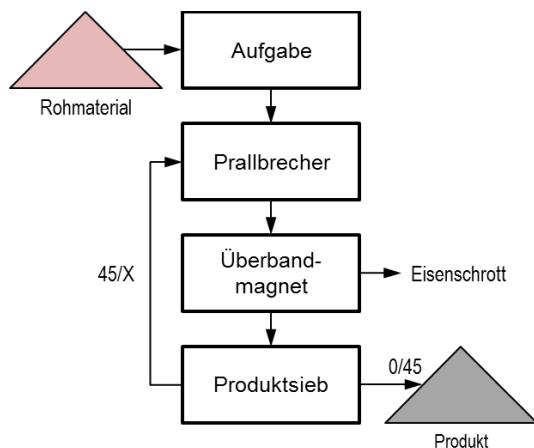


Abb. 3.2: Fließschema für eine einfache mobile Aufbereitungsanlage [126]

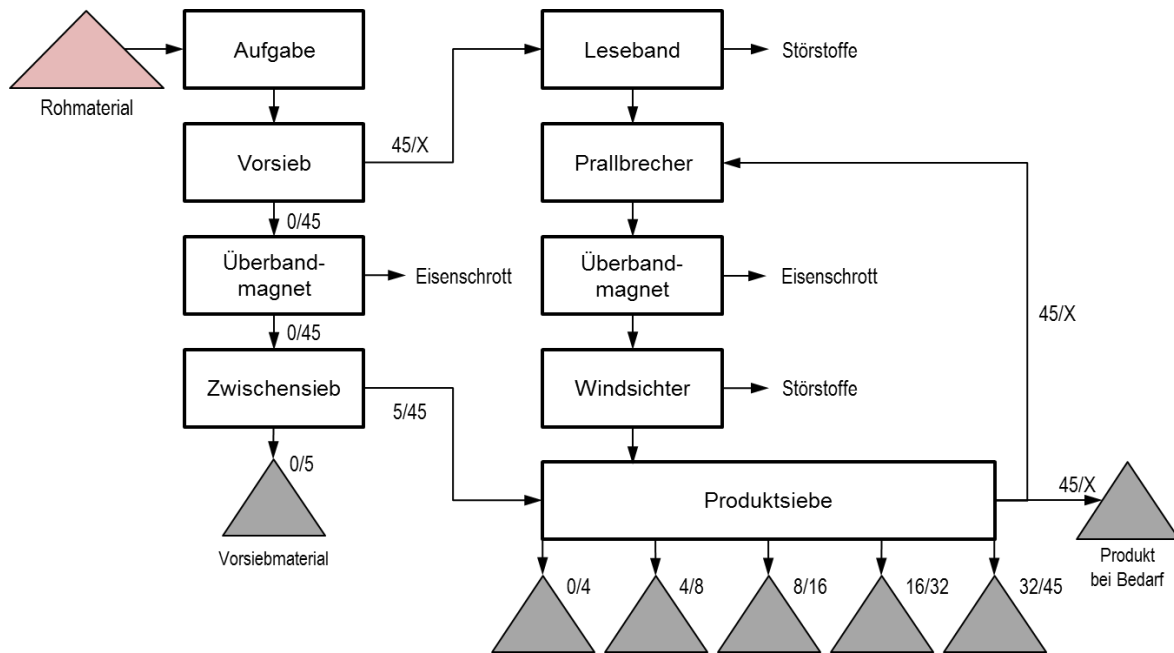


Abb. 3.3: Fließschema für eine einstufige stationäre Aufbereitungsanlage [126]

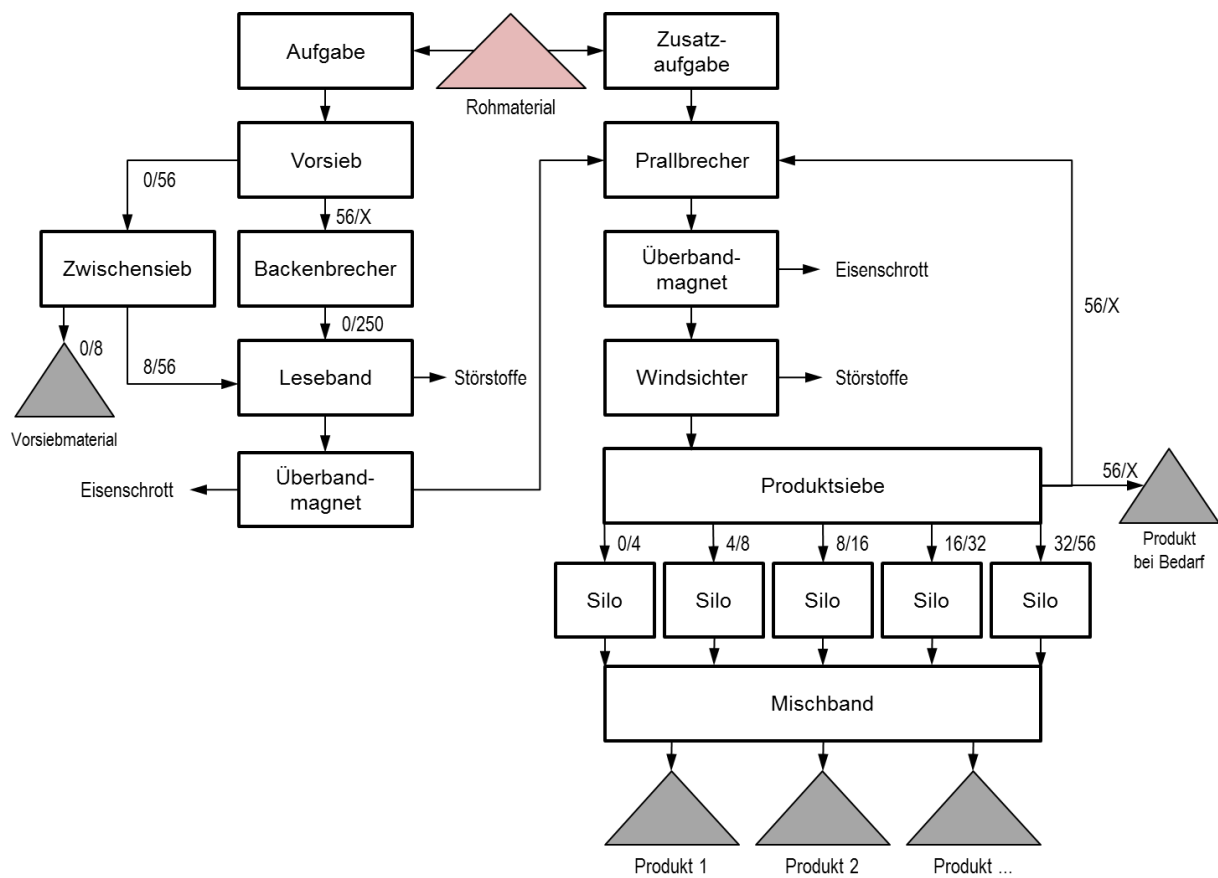


Abb. 3.4: Fließschema für eine zweistufige stationäre Aufbereitungsanlage [126]

3.4 Zusammensetzung und Eigenschaften von Mauerwerkbruch

Für die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden und Bauprodukten aus Mauerwerk sowie die Anwendung solcher Baurestmassen als RC-Baustoff bedarf es zuverlässiger Angaben über die stoffliche und chemische Zusammensetzung sowie die baustofflichen Eigenschaften, wie Korngrößenverteilung, Dichte und Wasseraufnahme der Mauerwerkbaustoffe. Hierbei müssen Schwankungsbreiten in Abhängigkeit von der Materialhistorie berücksichtigt werden [253], die sich aus den folgenden Einflussgrößen ergeben:

- Art der verwendeten Mauerwerkbaustoffe,
- regionale Unterschiede bei der Herstellung der Mauerwerkbaustoffe (z. B. Art und Herkunft der verwendeten Rohstoffe),
- Art der Baukonstruktion und -funktion des ursprünglichen Gebäudes,
- regionale Unterschiede in der Bauweise,
- Abbruchmethode (konventionell oder kontrolliert/selektiv),
- Art der Aufbereitung (Anlagenspezifika).

Schnell & Ludwig [212], Winkler [253] und Rübner [203] untersuchten umfassend die stofflichen, physikalischen, chemischen und umweltrelevanten Eigenschaften verschiedener Materialien aus Mauerwerkbruch. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden nachfolgend zusammengefasst.

Sortieranalysen von Mauerwerkbruch in [212] und [253] zeigen, dass die stoffliche Zusammensetzung abgerissener Gebäude im Wesentlichen gleiche Bestandteile aufweist, diese aber zu sehr unterschiedlichen Anteilen enthalten sind. Die Ergebnisse dieser Sortieranalysen sind Tab. 3.10 zusammengefasst. Die Hauptbestandteile bilden Mauerziegel, Kalksandsteine, Leichtbetonsteine, Porenbetonsteine, Betonsteine, Mörtel und Naturstein. Zudem sind als Fremdstoffe Holz, Glas, Metall, Kunststoffe sowie bituminöse und gipshaltige Stoffe zu nennen. Tendenziell ist eine Zunahme der Stoffvielfalt zu beobachten [177], [253].

Winkler [253] untersuchte die physikalischen Eigenschaften von 26 Proben aus Mauerwerkbruch. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tab. 3.11 zusammengefasst. Sie variieren in Abhängigkeit vom Stoffbestand der einzelnen Proben. In der Breite der Rohdichteverteilung (Abb. 3.6) spiegelt sich auch die vorhandene Stoffvielfalt wider [178].

Tab. 3.10: Stoffliche Zusammensetzung von Mauerwerkbruch [212], [253]

Bestandteil	Bandbreite der Untersuchungsergebnisse	
	Mauerwerkbruch, allgemein [253]	Mauerwerkbruch, ziegelhaltig [212]
	Anteil der Bestandteile > 4 mm in Ma.-%	Anteil der Bestandteile > 4 mm in Ma.-%
Ziegel	31 bis 79	26 bis 92
Beton	1 bis 27	3 bis 49
Mörtel	14 bis 49	4 bis 19
Naturstein	2 bis 24	
Holz / Papier	0 bis 0,3	1 bis 7
Glas	0 bis 0,5	
Gips	0 bis 5,2	
Keramik	0,2 bis 2,4	
Sonstige Bestandteile	0 bis 2,6	

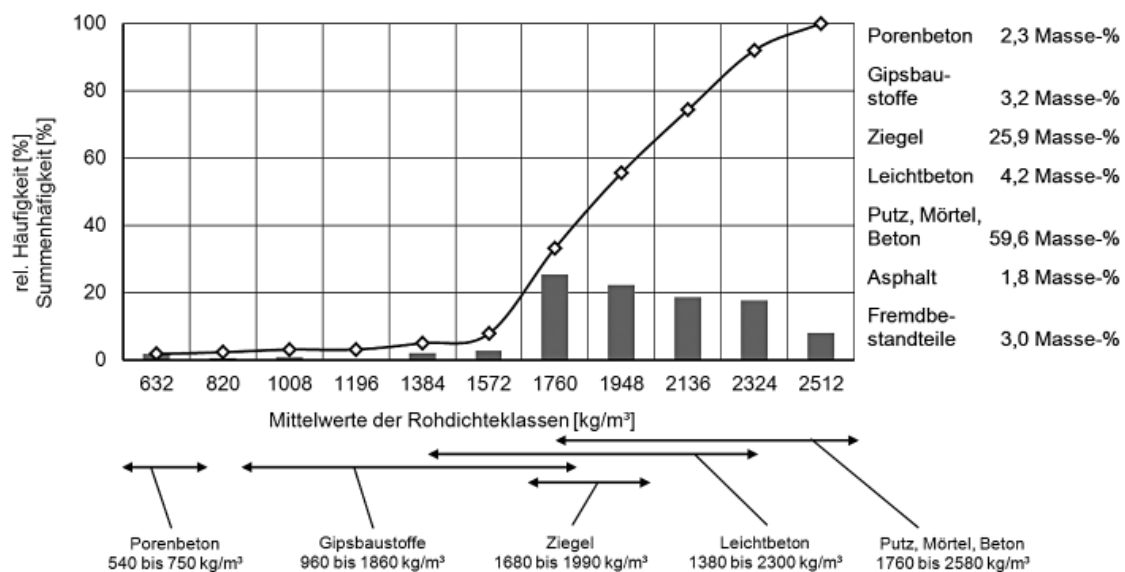


Abb. 3.5: Rohdichteverteilung der Bestandteile einer Probe aus ziegelhaltigem Mauerwerkbruch [178]

Tab. 3.11: Physikalische Eigenschaften von Mauerwerkbruch [230], [253]

Physikalische Eigenschaft	Bandbreite der Untersuchungsergebnisse
Reindichte [g/cm ³]	2,65 bis 2,75
Rohdichte [g/cm ³]	1,53 bis 2,10
Schüttdichte [g/cm ³]	0,9 bis 1,35
Wasseraufnahme [Ma.-%]	7,5 bis 19,4
Kornform	Ziegelbruchstücke zum Teil plattig, länglich; andere Bestandteile kubisch

Rübner [203] hat von verschiedenen in [212] untersuchten Proben die chemische Zusammensetzung bestimmt. Ausgewählte Ergebnisse sind in Tab. 3.12 als Schwankungsbreiten zusammengestellt. Bei den untersuchten Proben zeigten sich keine systematischen Veränderungen in Abhängigkeit der stofflichen Zusammensetzung. Proben mit hohem Ziegelanteil sind eisenreicher und calciumärmer [177], [213].

Zusätzlich zur chemischen Zusammensetzung wurde von Rübner [203] auch die Umweltverträglichkeit der Proben aus ziegelhaltigem Mauerwerkbruch bewertet. Die Schwermetallgehalte im Feststoff der untersuchten Materialien sind in Tab. 3.13 zusammengestellt. Die Gehalte liegen unterhalb der Grenzwerte für Feststoffe nach LAGA M 20 für den Abfalleinsatz in Produkten [42], [156], [157]. An einer Probe aus ziegelhaltigem Mauerwerkbruch wurden zusätzlich wässrige Eluate untersucht. Das Ergebnis enthält Tab. 3.14. Auch hier werden die geforderten Grenzwerte für Eluat nach LAGA M 20 für Zuordnungsklasse Z.2 für RC-Baustoffe [42], [157] (auch nach DIN 4226-100 [55]) unterschritten [177]. Schnöller et al. [216] geben in ihrer Arbeit für Abbruchobjekte im Hochbau einen Überblick zu Baustoffen und Bauteilen als mögliche Quellen ausgewählter Umweltparameter (Tab. 3.15).

Tab. 3.12: Chemische Zusammensetzung von ziegelhaltigem Mauerwerkbruch [203]

Parameter	Einheit	Bandbreite der Untersuchungsergebnisse
		Mauerwerkbruch, ziegelhaltig
SiO ₂	Ma.-%	67,7 bis 76,7
Al ₂ O ₃	Ma.-%	8,6 bis 12,3
Fe ₂ O ₃	Ma.-%	1,8 bis 5,3
CaO	Ma.-%	1,6 bis 11,4
MgO	Ma.-%	0,9 bis 2,3
K ₂ O	Ma.-%	0,9 bis 2,9
Na ₂ O	Ma.-%	0,1 bis 2,0
SO ₃	Ma.-%	0,2 bis 2,0
Cl ⁻	Ma.-%	0,02 bis 0,03
Glühverlust	Ma.-%	1,2 bis 9,6
CO ₂	Ma.-%	0,7 bis 8,5

Tab. 3.13: Schwermetallgehalte im Feststoff ausgewählter Proben aus Mauerwerkbruch [203]

Parameter*	Einheit	Bandbreite der Untersuchungsergebnisse	Grenzwert**
		Mauerwerkbruch, ziegelhaltig	
As	mg/kg	< 0,1 bis 27,9	150
Pb	mg/kg	31,1 bis 188,8	700
Cd	mg/kg	0,02 bis 0,62	10
Cr _{ges}	mg/kg	80,5 bis 129,4	600
Cu	mg/kg	26,0 bis 75,4	400
Ni	mg/kg	23,0 bis 37,6	500
V	mg/kg	29,0 bis 98,9	
Zn	mg/kg	65,6 bis 108,8	1500

* nach Totalaufschluss

** Grenzwerte für Feststoffe nach EP der LAGA M 20 für den Abfalleinsatz in Produkten [42], [156], [157]

Tab. 3.14: Schwermetall- und Salzgehalte im wässrigen Eluat der Probe MW 1 [203]

Parameter*	Einheit	Bandbreite der Untersuchungsergebnisse	Grenzwert**
		Mauerwerkbruch, ziegelhaltig	
pH	-	9,8	7 - 12,5
Leitfähigkeit	μS/cm	727,7	3000
Cl ⁻	mg/l	13,40	150
SO ₄ ²⁻	mg/l	300,20	600
TOC	mg/l	3,80	
As	μg/l	4,17	50
Pb	μg/l	5,93	100
Cd	μg/l	0,57	5
Cr _{ges}	μg/l	7,00	100
Cu	μg/l	4,77	200
Ni	μg/l	1,07	100
V	μg/l	33,37	
Zn	μg/l	5,27	400

* Schüttteleuat mit Wasser/Feststoff = 10:1 l/kg

** Grenzwerte für Eluat nach LAGA M 20 für Zuordnungsklasse Z.2 für RC-Baustoffe [42], [157] (auch nach DIN 4226-100 [55])

Tab. 3.15: Quellen ausgewählter Umweltparameter in Abbruchobjekten im Hochbau [216]

Umweltparameter	Quelle (Baustoff/Bauteil)	Gehalt im Baustoff/Bauteil
Blei	in metallischer Form: Bleirohre, Bleche (zur Feuchtigkeitsabdichtung im Hoch- und Tiefbau), Dachdeckungen, Strahlenschutzplatten Bleiverbindungen: Kabelummantelungen, Stabilisatoren PVC, Bleimennige als Rostschutzanstrich, Pigmente und Trockenstoffe in Farben und Lacken, Keramik-Glasuren, Platten und Folien zum Schall und Feuchtigkeitsschutz, Wand- und Bodenfliesen, Wandbeläge, Füllung und Schüttungen	als Metall bis 100 %, in Verbindungen bis mehrere 100 mg/kg
Cadmium	in Farben, Emaile und Kunststoffen als gelborangerotes Pigment, bei PVC-Produktion (z. B. Fenster, Türen, Rohre, etc.) als Stabilisator, bei Gummiartikeln als Färbemittel, Rostschutzüberzüge, Batterien (Nickel-Cadmium und Silber-Cadmium) und Gleichrichter, zum Löten von Aluminium (Blei-Cadmium-Zinn-Lote), Füllungen und Schüttungen, Mauersteine, Hüttenzement, Stahlbeton	unter 1 %
Arsen	Holzschutzmittel, Farbpigmente, Metalllegierungen	unter 1 %
Chrom	in metallischer Form: Haustechnik – Heizung, Legierungen Chromverbindungen: Farbpigmente, Fixierungen von Holzimprägnierungen, Korrosionsschutz, Pigmente in Tapeten, Gerbstoffe, Pigmente in der Bauindustrie, Zement, Schlackenzement, Schüttungen	wenige Prozent
Kupfer	in metallischer Form: Dachdeckung, Wasserleitungen, Kupferdrähte, Messing, Bronze, Blitzableiter, Dachrinne Kupferverbindungen: Fungizide, Holzschutzmittel, Bakterizide in Teppichen	als Metall: bis 100%, in Verbindungen bis mehrere 100 mg/kg
Zink	in metallischer Form: Dachdeckung, Verzinkungen, Lüftungskanäle Zinkverbindungen: Flammenschutzmittel, Fungizide, Grundierung und Spachtelmassen, Trockenstoffe in Farben und Lacke, Stabilisatoren in PVC, Bautenschutzanstriche, Zinkpulver (Pigment in hellen Farben)	unter 0,1 bis 100 %

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite.

Tab. 3.15: Quellen ausgewählter Umweltparameter in Abbruchobjekten im Hochbau [216]
(Fortsetzung)

Umweltparameter	Quelle (Baustoff/Bauteil)	Gehalt im Baustoff/Bauteil
Nickel	in metallischer Form: Legierungen, Edelstahl Nickelverbindungen: Keramische Farben und Glasuren, Pigmente in Kunststofffarben, Lacke und Fassadenanstriche, vernickelte Grafitfasern in Belägen und Beschichtungen, Pigmente in chemischen Nachbeizen für Holz	unter 0,1 bis 100 %
Sulfat	Gipskartonplatten, Gipswandbauten, Mörtel, Estrich, Flammenschutzmittel, Farbpigmente	unter 0,1 bis 100 %
PAK	teer- und pechhaltige Klebstoffe und Farben (z. B. Holzparkett), Asphalt-Fußbodenbeläge (z. B. Gussasphalt, Hochdruckplatten), teerhaltige Beschichtung von Trinkwasserleitungen, bituminierte Dichtungs- und Dachbahnen (z. B. Kellerisolierungen, Dachpappe, Holzschutz), Bitumenlösungen, Bitumenvergussmassen, Bitumenlacke, Bitumenemulsionen	Steinkohlenteer: über 30 %, Asphaltfußbodenplatten: 1,6 %, Teerklebstoffe: 5 bis 20 %
polychlorierten Biphenylen (PCB)	Kondensatoren (HKLS – Kondensator in Lampen), Dauerelastische Dichtmassen: Gebäudetrennfugen, Bewegungsfugen, Anschlussfugen (z. B. von Fenstern, Fensterbänken, Türcargen), Fugen im Sanitärbereich, Farb- und Brandschutzanstrichstoffe, Buntsteinputze, Klebstoffe, Vergussmassen	Dichtungsmasse: 1 bis 30 % (50 %) Anstrichstoffe: bis 10 % Sekundärkontamination: <ul style="list-style-type: none"> keine bis gering: mineralische Baustoffe, Fensterkitt, Holz mäßig: Mineralwolle-Dämmstoffe, Karton von GK-Platten hoch: Kunststoff- und Linoleumbodenbeläge sehr hoch: Lacke auf Metalloberflächen
Pentachlorphenol (PCP)	Holz (Schnittholz, nachträglich im Gebäude für dekorative und für Holzschutzmaßnahmen aufgebracht), Spachtel und Vergussmassen, Fugendichtungsmittel, Entschalungsmittel, Kitte, Anstrichstoffe, Wollteppichböden	Eindringtiefe bei behandeltem Holz bis zu 1 cm: sekundär belastet: 1-10 mg/kg im durchtränkten Bereich (Abnahme durch Ausgasung) bis ca. 1000 mg/kg
Quecksilber	Holzschutzmittel, Leuchtstoffröhren, Quecksilberdampflampen, Energiesparlampen, Lacke (Fungizide, Algizide, Rotpigmente, Insektizide)	bis mehrere 100 mg/kg
Nitrat/Nitrit	Düngemittel, Putz und Putzträger, Trennwände	Putz und Putzträger: 4000 mg/kg Trennwände: 4000 mg/kg

3.5 Mengen und Anwendung von Mauerwerkbruch

In Deutschland fallen als Teilstrom der Baurestmassen erhebliche Mengen Mauerwerkbruch an. Eine direkt auf Wandbausteine bezogene Statistik von Abbruchmengen für Deutschland existiert derzeit jedoch nicht. Die Mengen, die aus dem Rohstoffspeicher Baubestand als Rückbaumaterial bei Abriss-, Umbau- und Sanierungsarbeiten in Deutschland anfallen werden, lassen sich aber aus dem jährlichen Bauschuttanfall bzw. aus den Produktionszahlen von Wandbausteinen ableiten:

- Der jährlich anfallende Bauschutt wird seit 1996 statistisch erfasst und beläuft sich durchschnittlich auf 55,6 Millionen Tonnen im Jahr. Werden dabei die Baustofflager Mauerwerk und Beton gegenübergestellt, ergibt sich für Mauerwerk ein Anteil von 20 Prozent [177].
- Die Produktionsmengen der marktrelevanten Mauersteinarten werden durch die Statistischen Bundes- und Landesämter erfasst. Die Meldekriterien für die mauersteinproduzierenden Werke lassen allerdings nur bedingt Vergleiche für den Bereich der unterschiedlichen Mauerwerksprodukte in Deutschland zu [40]. Gemäß der Deutschen Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V. (DGfM) produzierte die deutsche Mauersteinindustrie in den Jahren von 1996 bis 2006 die in Abb. 3.6 angegebenen Mengen an Wandbausteinen. Die Menge an Mauerwerkbruch entspricht nach [177] etwa 20 Prozent der aktuell produzierten Menge an Wandbaustoffen.

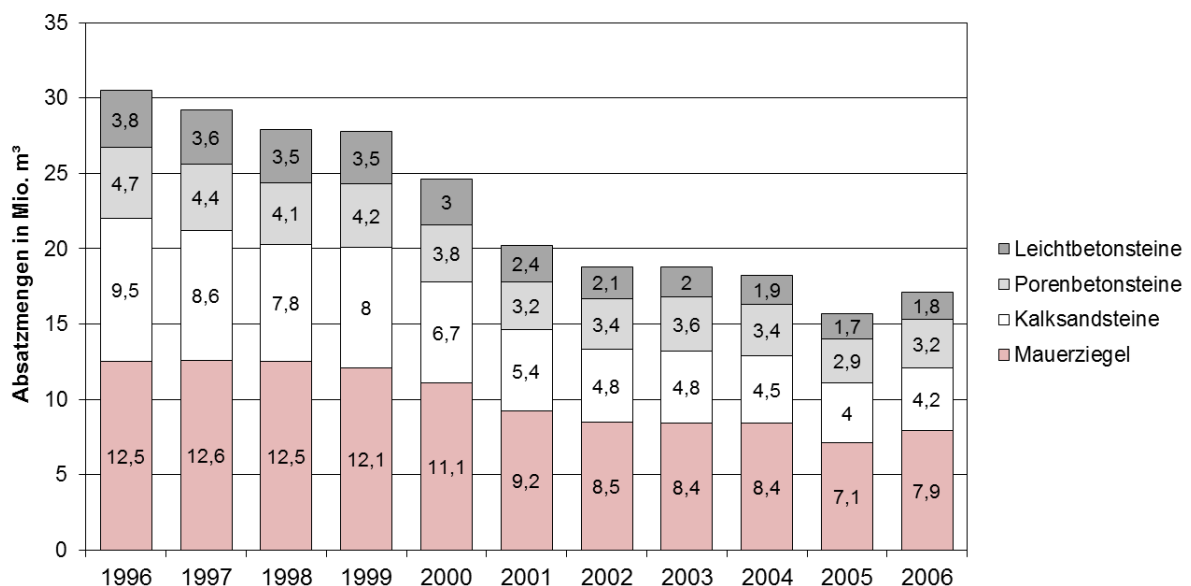


Abb. 3.6: Absatzentwicklung für Mauersteine von 1996 bis 2006 in Deutschland [39]

Nach Schätzung von Müller [177] ist pro Jahr mit 5 bis 10 Millionen Tonnen heute vornehmlich heterogen anfallendem Mauerwerkbruch (inklusive Gipsbauplatten, Putzen, Mörteln und mineralischen Dämmstoffen) zu rechnen [177]. Die Darstellung in Abb. 3.7 verdeutlicht die Mengen, die letztlich als Rohstoff für die Herstellung von RC-Baustoffen zur Verfügung stehen. Tab. 3.16 gibt eine Übersicht zum vielfältigen Angebot aus Forschung und Praxis zur Anwendung von Mauerwerkbruch in Abhängigkeit von Materialqualität und Korngröße. Sorgfältig rückgebaute Mauersteine können, insbesondere im Bereich der Denkmalpflege, erneut als Mauersteine Wiederverwendung finden. Aufbereitete Mauerwerksrestmassen können unter bestimmten technischen und ökologischen Voraussetzungen wie Sortenreinheit und Umweltverträglichkeit und bei entsprechend strenger Eingangskontrolle bei der Herstellung neuer Mauersteine wiederverwertet werden. Darüber hinaus erfolgt eine Weiterverwertung von Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch im Erd-, Straßen- und Wegebau, in der Vegetationstechnik sowie im Betonbau [126].

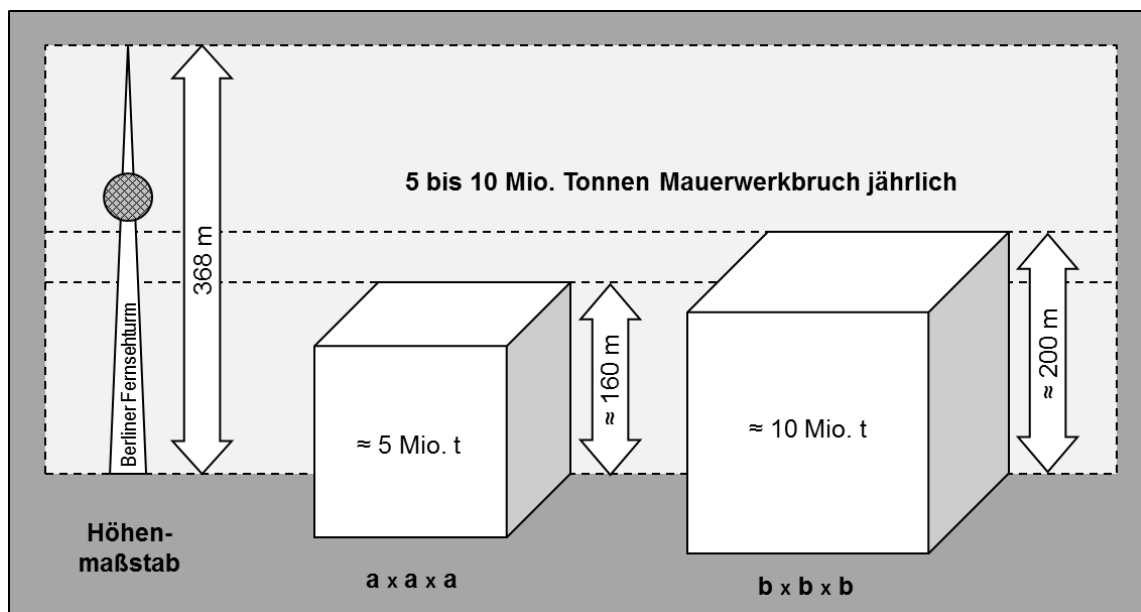


Abb. 3.7: Jährlich anfallende Mengen an Mauerwerkbruch gemäß Schätzung nach [177]

Im Jahr 2012 wurden unter Berücksichtigung der rezyklierten Gesteinskörnungen, die bei der Aufbereitung der Fraktionen Bauschutt, Boden und Steine sowie Baustellenabfälle anfielen, insgesamt 66,2 Millionen Tonnen Recyclingbaustoffe hergestellt. Damit deckten die Recyclingbaustoffe einen Anteil von zwölf Prozent des Bedarfs an Gesteinskörnungen ab. In Abb. 3.8 werden die Anteile der einzelnen Anwendungspfade grafisch dargestellt. Von den hergestellten Recyclingbaustoffen wurden 51,7 Prozent im Straßenbau, 20,6 Prozent im Erdbau und 9,1 Prozent in sonstigen Anwendungen, überwiegend im Deponiebau, verwertet. Als Gesteinskörnung in der Asphalt- und Betonherstellung wurden 19,0 Prozent eingesetzt [149].

Im Jahr 2008 fanden lediglich 1,2 Prozent Einsatz als rezyklierte Gesteinskörnung in der Betonherstellung [148].

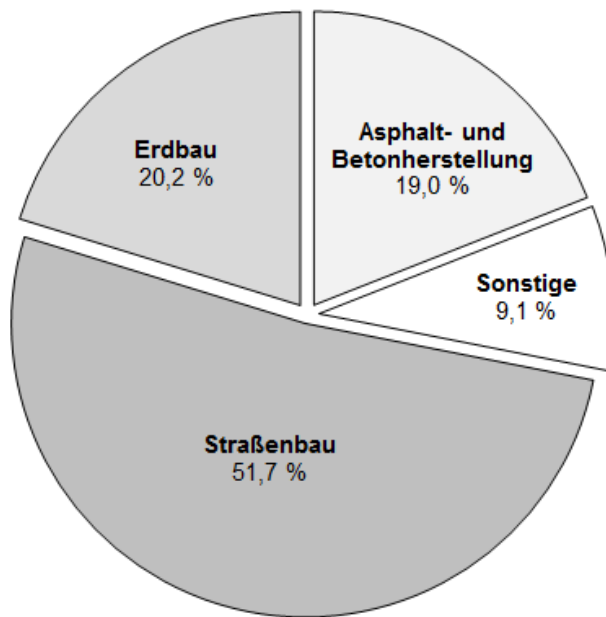


Abb. 3.8: Anwendung von Recyclingbaustoffen in Deutschland im Jahr 2012 [149]

Tab. 3.16: Stoff- und korngroßenspezifische Anwendungsmöglichkeiten für Mauerwerkbruch

Materialqualität	Mauer- steinart	Anwendungsmöglichkeit	übliche Lieferkörnungen [mm]				Forschung	Quellen
			Mehl < 0,1 mm	Brechsand 0 bis 2 mm	Splitt 2 bis 32 mm	Schotter > 32 mm		
100	Mauer- ziegel	Magerungsmittel bzw. Füllstoff bei der Mauerziegel-Herstellung	< 0,1				x	[9], [179]
		Mauerstein-Herstellung		0/4			x	[107], [179]
		Recycling-Mauerstein		0/2			x	[89], [90]
		Gesteinskörnung für Formkörper		0,35/2, 2/8, 3/16, 8/16			(x)	[230]
		Gesteinskörnung für Beläge mit Oberflächenschliff		0,35/2, 2/8, 3/16, 8/16			(x)	[230]
		Zierkies > 8 mm		8/16, 16/32, 32/63			x	[170], [214], [229]
		Schotterrasen		0/32			(x)	[84], [13]
		farbgebender Zusatz für Putzmörtel (Gelb-, Rot-, und Brauntöne)		< 2			(x)	[135], [143], [205], [218]
		Zementumhüllstoff/Betonzusatz	< 0,1				x	[174], [175]
		Tennenbelag (Sportplatzbau)		0/1, 0/2, 0/3			x	[48], [171], [230], [259]
≥ 80	Mauer- ziegel	Wiederverwertung von Abbruch-Ziegeln als hochwertiger Bodenbelag					x	[246]
		Pflanzsubstrate (Dachbegrünung)			2/12		x	[84], [102], [13]
		Drainschichten (Dachbegrünung)			4/16		x	[102], [13], [230]
		Vegetationsschicht (Dachbegrünung)		0,1/16			x	[102], [13], [230]
		Baumsustrate		0/16			x	[84], [102], [13], [201], [202], [109], [120], [241]
		rezyklierte Gesteinskörnung für Betonwaren und -elemente, Liefertyp 3			2/8, 8/16		(x)	[36], [55], [171]
		rezyklierte Gesteinskörnung für Mörtel (Putz), Liefertyp 3		0/2 bis 0/6, 2/4			(x)	[36], [55], [84], [143], [171]
		rezyklierte Gesteinskörnung für Beton bis C 8/10, unbewehrt, nicht tragende Bauteile, Liefertyp 4			2/8, 8/16, 16/32		(x)	[36], [55], [171]
		rezyklierte Gesteinskörnung für Mörtel (Putz), Liefertyp 4		0/2 bis 0/6, 2/4			(x)	[36], [55], [171]
		Damm- und Verfüllbaustoff für Erdbaumaßnahmen		0/4 bis 0/32, bis 0/300			x	[84], [234], [260]
≥ 10	Kalk- sandstein	Drainagematerial			4/8, 4/45		(x)	[174]
		Mineralische Dämmschüttungen (Trittschall, Wärme)		0,25/6			(x)	[84]
		Rohstoff für die Herstellung leichter Gesteinskörnungen 0/8 mm	< 0,1				x	[177], [195], [196], [230], [212]
		Recycling-Mauerstein		0/2			x	[89], [90]
		Deponiebaustoff			8/32		x	[87]
		Kalksandstein-Herstellung		0/8			x	[85], [91], [179]
		rezyklierte Gesteinskörnung für Beton für tragende Bauteile Expositionsklasse XF1			2/8, 8/16, 16/32		x	[86]
		rezyklierte Gesteinskörnung für Beton bis C 8/10, unbewehrt, nicht tragende Bauteile, Liefertyp 4			2/8, 8/16, 16/32		(x)	[36], [55], [171]
		rezyklierte Gesteinskörnung für Mörtel (Putz), Liefertyp 4		0/2 bis 0/6, 2/4			(x)	[36], [55], [171]
		Damm- und Verfüllbaustoff für Erdbaumaßnahmen		0/4 bis 0/32, bis 0/300			x	[84], [234], [260]
≥ 80	Kalk- sandstein	Drainagematerial		4/8, 4/45			(x)	[174]
		Mineralische Dämmschüttungen (Trittschall, Wärme)		0,25/6			(x)	[84]

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite.

Tab. 3.16: Stoff- und korngroßenspezifische Anwendungsmöglichkeiten für Mauerwerkbruch (Fortsetzung)

Materialqualität	Anwendungsmöglichkeit	übliche Lieferkörnungen [mm]				Praxis	Forschung	Quellen
		Mehl < 0,1 mm	Brechisand 0 bis 2 mm	Splitt 2 bis 32 mm	Schotter > 32 mm			
Poren- beton	Hygieniestreu, Öl- und Flüssigkeitsbinder		0/2			x		[192], [195], [226]
	Deponiebaustoff		4/16				x	[87]
	Granulat zur Abwasserreinigung		0/10				x	[5], [192], [195]
	Granulat zur Rauchgasreinigung		0/10			x		[192], [195], [238]
	Gesteinskörnung für Leichtbaustoffe (Leichtmörtel, -beton, Dämmputz)		0/2			x		[192], [195]
	Gesteinskörnung für Leichtmörtelsteine		0/2, 0/8				x	[128]
	Düngemittelzusatz (Sulfatträger, Nährstoffträger), Bodenverbesserung		1/5, 1/10				x	[101], [110], [184], [245]
	Porenbetonstein-Herstellung		0/1			x		[84], [167], [179], [180], [196]
	Pflanzsubstrate (Dachbegrünung)			2/12		x		[84], [102], [13]
	Drainschichten (Dachbegrünung)			4/16		x		[102], [13], [230]
Leicht- beton	Vegetationsschicht (Dachbegrünung)		0, 1/16			x		[102], [13], [230]
	Baumsubstrate		0/16			x		[84], [102], [13]
	Mineralische Dämmschüttungen (Trittschall, Wärme)		0,25/6			(x)		[84]
	Leichtbetonstein-Herstellung		0/16			(x)		[84]
	Drainagematerial			4/8, 4/45		(x)		[174]
	Mineralische Dämmschüttungen (Trittschall, Wärme)		0,25/6			(x)		[84]
	Damm- und Verfüllbaustoff für Erdbaumaßnahmen		0/4 bis 0/32, bis 0/300			x		[84], [234], [260]
	rezyklierte Gesteinskörnung für Beton, Liefertyp 1		2/8, 8/16, 16/32			(x)		[36], [55], [181]
	rezyklierte Gesteinskörnung für Mörtel (Putz), Liefertyp 1		0/2 bis 0/6, 2/4			(x)		[36], [55], [171]
	rezyklierte Gesteinskörnung für Beton bis C 25/30, Liefertyp 2		2/8, 8/16, 16/32			(x)		[36], [55], [181]
gemischter Mauerwerkbruch	rezyklierte Gesteinskörnung für Mörtel (Putz), Liefertyp 2		0/2 bis 0/6, 2/4			(x)		[36], [55], [171]
	rezyklierte Gesteinskörnung für Beton bis C 8/10, unbewehrt, nicht tragende Bauteile, Liefertyp 4		2/8, 8/16, 16/32			(x)		[36], [55], [181]
	rezyklierte Gesteinskörnung für Mörtel (Putz), Liefertyp 4		0/2 bis 0/6, 2/4			(x)		[36], [55], [171]
	Tragschichten ohne Bindemittel		0/32			x		[88][155][235]
	Bettungsmaterial für Pflasterarbeiten (Pflastersand)		0/4, 4/8			x		[174][230]
	Tragschichten im Sportplatzbau		0/32			x		[48][174]
	Damm- und Verfüllbaustoff für Erdbaumaßnahmen		0/4 bis 0/32, bis 0/300			x		[84], [234], [260]
	Drainagematerial			4/8, 4/45		(x)		[174]
	Mineralische Dämmschüttungen (Trittschall, Wärme)		0,25/6			(x)		[84]
	Rohstoff für die Herstellung leichter Gesteinskörnungen 0/8 mm	< 0,1				x		[177], [195], [196], [230], [212]

4 Bewertung von Prozessen und Produkten

4.1 Bewertungsansätze

Zur Lösung komplexer Planungsprobleme, wie der Lebensendphase von Bauwerken, Bauteilen und Bauprodukten, kommen simultane oder sukzessive Bewertungsansätze in Betracht [123], [125]. Simultanbewertungsmodelle berücksichtigen alle wesentlichen sachlichen und zeitlichen Wechselwirkungen in einem Bewertungsmodell. Sie stellen dadurch zwar die beste, aber auch aufwendigste Art der Berücksichtigung von Randbedingungen und Wechselwirkungen dar [228], [14], [137]. Aufgrund ihrer Komplexität finden sie in der Praxis wenig Beachtung [228], [14], [257], [232], [19]. Besser geeignet erscheinen sukzessive Bewertungsmodelle, die ein gegebenes Gesamtproblem zunächst in mehrere Teilprobleme zerlegen. Diese Teilprobleme werden durch geeignete Analysen unabhängig voneinander gelöst und die so erhaltenen Teillösungen aufeinander abgestimmt. Die Zerlegung des Gesamtproblems in Teilprobleme sollte dabei so erfolgen, dass die Wechselwirkungen innerhalb eines Teilproblems möglichst groß und zwischen den Teilproblemen möglichst gering sind. Gegenüber der Simultanbewertung ist die Sukzessivbewertung flexibler, transparenter und für komplexe Problemstellungen praktikabler. Allerdings kann aufgrund der unvollkommenen Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Teilproblemen der Anspruch an eine optimale Gesamtlösung verloren gehen [228], [14], [137], [257], [232].

4.2 Analysemethoden

4.2.1 Allgemeines

Die Bewertung von Prozessen im Bereich des gesamten Lebenszyklus' oder einzelner Lebensphasen von Bauwerken und Bauprodukten hat die Aufgabe, die mit den Prozessen verbundenen Aufwendungen ins Verhältnis zu den zu erwartenden Vor- und Nachteilen zu setzen, abschließend eine systematische Abwägung durchzuführen und somit eine Bewertung von Handlungsalternativen vorzunehmen. Die Bewertung muss unter Berücksichtigung vorgegebener Ziele und Kriterien erfolgen. Für die Durchführung der notwendigen Bewertung wurde in den vergangenen Jahrzehnten, überwiegend im Bereich von Projektplanungen der öffentlichen Hand, eine Vielzahl von Analysemethoden entwickelt. Darunter sind die Kosten-Nutzen-Analyse (KNA), die Nutzwertanalyse (NWA) und die Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA) die bekanntesten eingesetzten Methoden [23]. Diese drei Analysemethoden werden nachfolgend erläutert, um deren Unterschiede herauszuarbeiten. Darauf aufbauend wird in Kap. 6.1 die für die Zielsetzung der Arbeit geeignetste Methode ausgewählt.

4.2.2 Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)

Die KNA versucht, die gesamtwirtschaftlichen Vor- und Nachteile (Nutzen und Kosten) von Handlungsalternativen zu bestimmen und zu quantifizieren [7]. Dabei stehen Effizienzüberlegungen im Vordergrund. Primäres Ziel der Kosten-Nutzen-Analyse ist, eine Aussage über die jeweilige gesellschaftliche Vorteilhaftigkeit (Nutzen) einzelner Alternativen bei gegebenem Kostenumfang zu ermöglichen. Es wird schließlich die Handlungsalternative ausgewählt, die eine positive Differenz bzw. die größte Differenz zwischen Nutzen und Kosten aufweist. Im Gegensatz zu KWA und NWA werden zum quantitativen Vergleich der Alternativen alle Wirkungen in Geldeinheiten ausgedrückt (Monetarisierung) und durch Abzinsung (Diskontierung) auf einen Stichtag vergleichbar gemacht [30], [133]. Es wird bei der Ermittlung von Kosten und Nutzen davon ausgegangen, dass alle in die Bewertung einfließenden qualitativen Größen auch monetär bewertbar sind [168]. Die Kosten-Nutzen-Analyse findet am häufigsten Anwendung bei der Untersuchung von Einzelprojekten im Bereich der Verkehrsinfrastruktur [11], aber auch auf den Gebieten Energie- und Wasserwirtschaft [217], [221], [187]. Die KNA gilt dabei weniger als Entscheidungsverfahren, sondern mehr als Entscheidungshilfe oder als Instrument der Entscheidungsvorbereitung [7], [221]. Sie wird auch als Instrument der nachträglichen Erfolgskontrolle eingesetzt. Ihre Attraktivität beruht vor allem darauf, dass sie einen nachvollziehbaren methodischen Rahmen zur Abwägung zwischen den Folgen der jeweiligen Alternativen erlaubt [210], [133].

Das Vorgehen bei einer Kosten-Nutzen-Analyse ist in Abb. 4.1 schematisch dargestellt. Im ersten Teil der KNA soll die eigentliche Analyse vorbereitet werden. Er dient der Festlegung der Problemstellung sowie der räumlichen und zeitlichen Abgrenzung des Untersuchungsrahmens. Es werden relevante Nebenbedingungen diskutiert, zu denen Beschränkungen (z. B. maximales Budget) und bestimmte Zielvorgaben (z. B. festgelegte Höhe von CO₂-Emissionen) gehören. Anschließend werden die Handlungsalternativen definiert, die im Rahmen der Kosten-Nutzen-Analyse untersucht werden sollen [118], [23], [133]. Im KNA-Kalkül werden die Auswirkungen der untersuchten Alternativen beschrieben. Es wird festgelegt, welche Effekte in die KNA einfließen und welche qualitativ beschrieben werden müssen. Im Anschluss werden die entscheidenden Kosten- und Nutzenarten identifiziert und die für die Monetarisierung der verschiedenen Effekte zur Verfügung stehenden Bewertungsansätze ausgewählt. Nun erfolgen die Mengenermittlung der einzelnen Kosten- und Nutzenarten sowie eine Monetarisierung der Nutzenarten. Im nächsten Schritt werden Kosten und Nutzen mittels Diskontierung homogenisiert. Dabei werden die periodenweise ermittelten Kosten und Nutzen, die zu unterschiedlichen Zeiten anfallen, zwecks Vergleichbarkeit auf den Gegenwartswert abgezinst. Danach werden die für die einzelnen Alternativen ermittelten Kosten-Nutzen-Differenzen gegenübergestellt. Anschließend erfolgt die Ergebnisbearbeitung. Sensitivitätsanalysen ermöglichen dabei durch Variation der Analyseeingangsparameter das Er-

kennbarmachen möglicher Unsicherheiten der im Vorfeld getroffenen Annahmen zu den Auswirkungen der einzelnen Kosten- und Nutzenarten auf das Gesamtergebnis. Im Anschluss werden die nicht eingegangenen Effekte offengelegt und diskutiert. Den Abschluss der KNA bildet die Empfehlung der vorteilhaftesten Alternative [23], [118], [133].

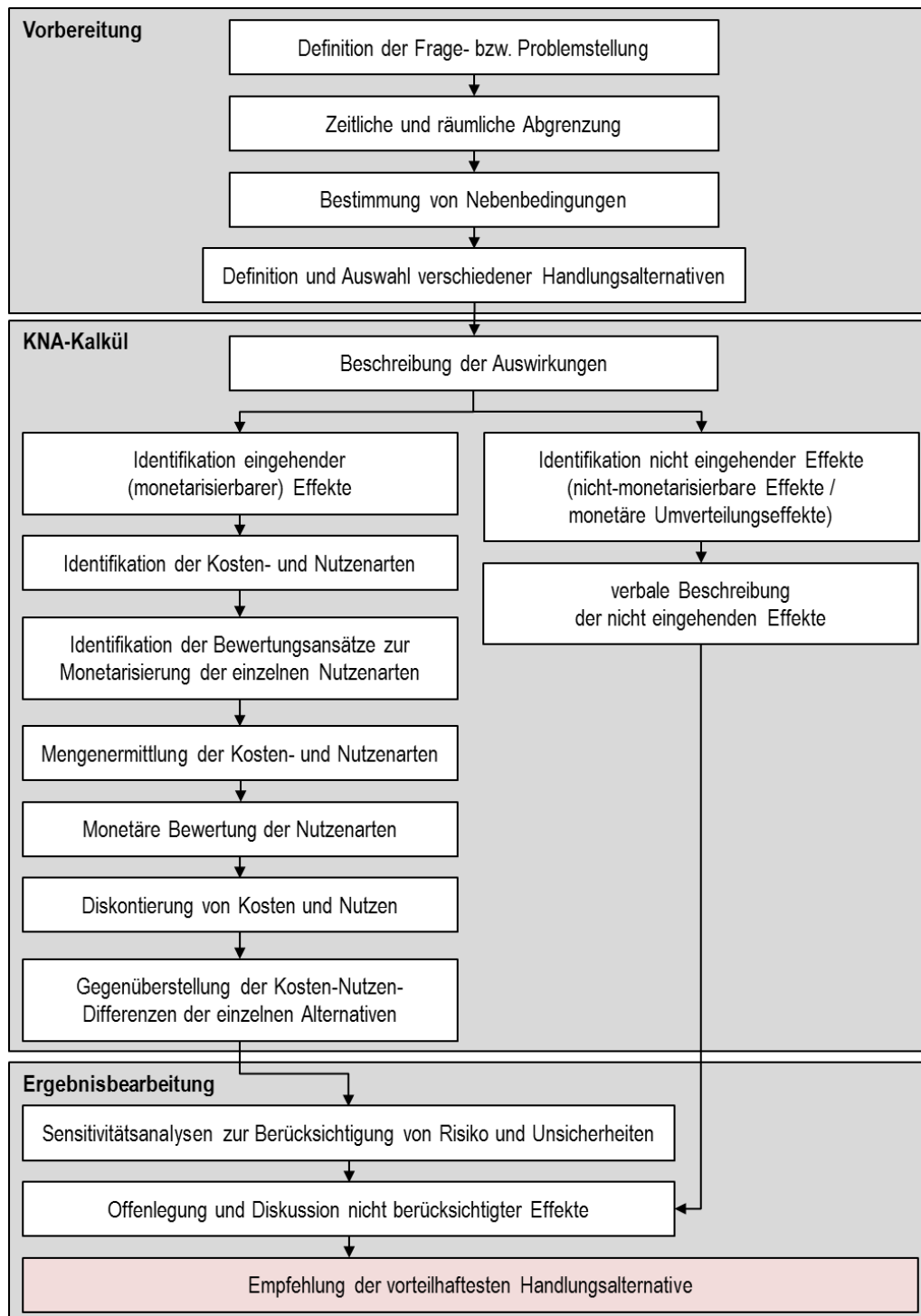


Abb. 4.1: Ablaufschema für eine Kosten-Nutzen-Analyse, geändert nach [23]

Die Notwendigkeit zur Monetarisierung aller Effekte wird immer wieder an der KNA kritisiert. Während Befürworter der KNA gerade die Monetarisierung als Vorteil gegenüber vielen anderen Methoden ansehen, stellen Kritiker sie als unzulässige Vereinfachung der tatsächlich stattfindenden Effekte dar [118]. So können bestimmte Arten von Schäden gar nicht monetarisiert werden oder ihre Höhe ist dem Verdacht der willkürlichen Festlegung (z. B. bei nicht-materiellen Schäden) ausgesetzt [94]. Hinzukommt Kritik im Zusammenhang mit der Bewertung eines Menschenlebens. Das sei von zu großer Bedeutung und sollte somit aus ethischen Gründen einer monetären Bewertung gänzlich verschlossen bleiben. Dem wird entgegengehalten, dass ein völliger Verzicht auf die Bewertung eines Menschenlebens nicht weniger bedeuten würde, als diesem implizit den Wert Null beizumessen [118], [23]. Ferner entstehen Unsicherheiten in der Bestimmung der exakten Kosten-Nutzen-Differenz aufgrund von Wissensdefiziten über ökologische und sozioökonomische Kausalzusammenhänge zwischen Projektalternativen und ihren Auswirkungen [94], [133]. Eine zusätzliche Schwierigkeit besteht in der Festlegung des geeigneten Diskontierungszinssatzes. Während für Marktpreise die marktübliche Verzinsung noch plausibel erscheint, ist bei der Monetarisierung vor allem immaterieller Effekte die Verzinsung willkürlich [94]. Bei Diskontierung mit positivem Zinssatz gilt die Annahme, dass das Heute einen größeren Stellenwert als das Morgen hat. Zukünftige Nutzenströme werden niedriger bewertet als heute auftretende Nutzenströme. Heute anfallende Kosten wiegen schwerer als zukünftige Kosten [23]. Bei Schäden, die zukünftige Generationen betreffen, wird daher die Legitimität einer Diskontierung grundsätzlich in Frage gestellt [94], [133]. Die Kosten-Nutzen-Analyse bietet zudem weder eine Betrachtung der Verteilung von Kosten und Nutzen zwischen einzelnen Gruppen von Betroffenen, noch wird die unterschiedliche Wahrnehmung von Problemen durch verschiedene Gruppen berücksichtigt. Dadurch ist die Favorisierung bestimmter Lösungsoptionen von der sozialen Gruppierung abhängig. So entsteht häufig die Situation, dass die gewählte Handlungsalternative trotz hoher Nutzen-Kosten-Differenz nicht zum gewünschten Erfolg führt, da aufgrund von Opposition gegenüber bzw. Nicht-Kooperation mit einzelnen Gruppen die Interessen eben dieser Gruppen nicht berücksichtigt werden [115], [133]. Darüber hinaus sind für die Durchführung einer KNA erhebliche zeitliche, personelle und finanzielle Aufwendungen erforderlich. Beispielsweise können bereits im Vorfeld der eigentlichen Analyse Studien zur Quantifizierung und Monetarisierung der Auswirkungen notwendig sein [94], [221], [133]. Weitere Einzelheiten zur Kosten-Nutzen-Analyse finden sich in der Fachliteratur [23], [133], [168], [118], [210], [30], [154].

4.2.3 Nutzwertanalyse (NWA)

Die Nutzwertanalyse stellt eine andere bedeutende Analysemethode dar. Bei der NWA werden Handlungsalternativen im Rahmen eines multidimensionalen Zielsystems nach ihrer Vorteilhaftigkeit geordnet. Diese Ordnung wird durch die Angabe von Nutzwerten als Ge-

samtwert ausgedrückt [23]. Die gesuchten Nutzwerte stellen jeweils das Ergebnis einer ganzheitlichen Bewertung sämtlicher Zielerträge einer Alternative dar [133]. Dabei können auch solche Bewertungskriterien einbezogen werden, die subjektiv und nicht in Geldeinheiten ausdrückbar sind (wie z. B. technische, psychologische oder soziale Bewertungskriterien) [133]. Im Unterschied zur Kosten-Nutzen-Analyse und zur Kosten-Wirksamkeitsanalyse werden die Kosten einer Maßnahme nicht explizit berücksichtigt. Jedoch können anfallende Kosten als negative Teilnutzwerte aufgenommen werden [23]. Die NWA erscheint aufgrund der leicht verständlichen Vorgehensweise zur Berücksichtigung aller relevanten Bewertungskriterien für die Entscheidungsunterstützung bei ökologieorientierten Problemstellungen besonders geeignet. Sie ist insbesondere in der wasserwirtschaftlichen Praxis ein häufig angewandtes Planungs- und Bewertungsinstrument [133]. Der Ablauf einer Nutzwertanalyse ist in Abb. 4.2 schematisch dargestellt.

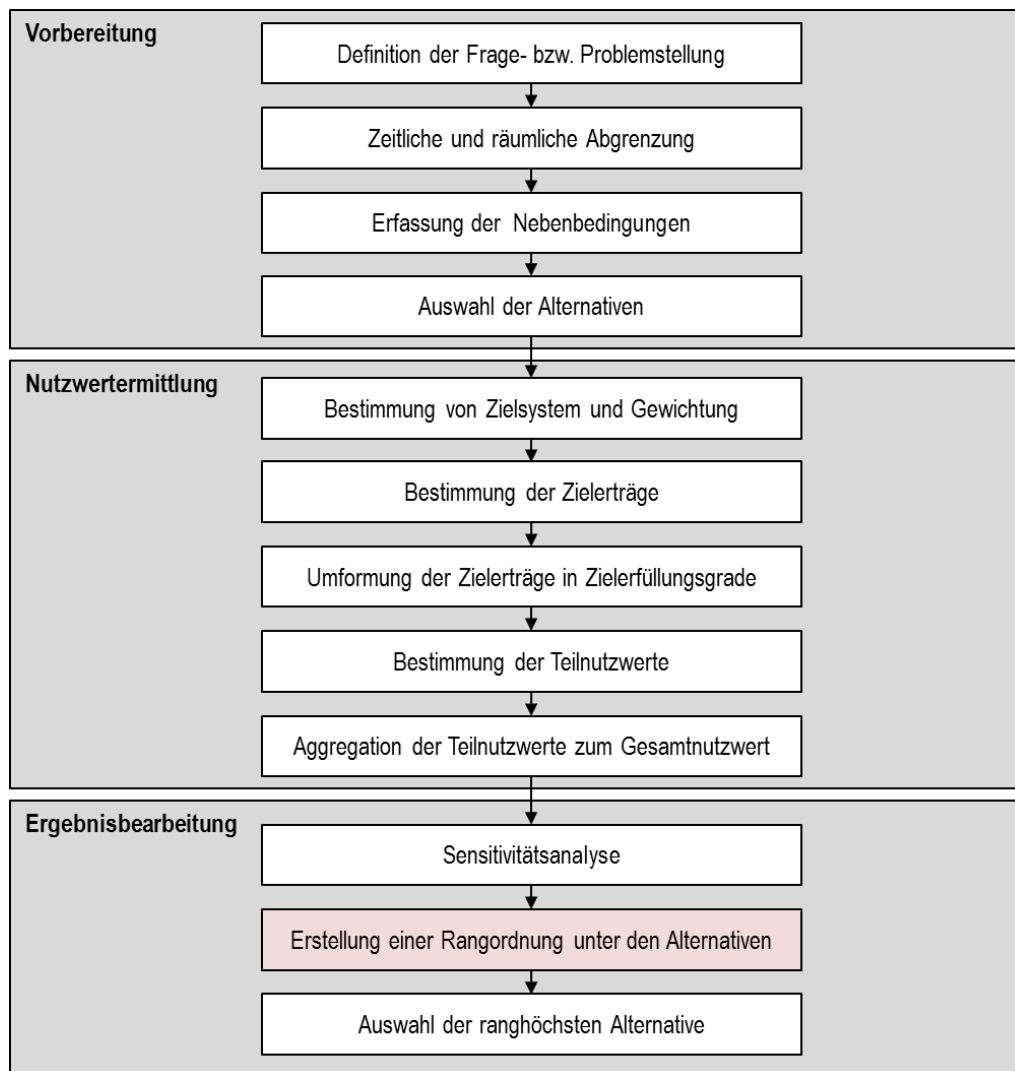


Abb. 4.2: Ablaufschema für eine Nutzwertanalyse geändert nach [23]

Zunächst wird die Problemstellung definiert sowie die räumliche und zeitliche Abgrenzung des Untersuchungsrahmens festgelegt. Nach der Erfassung aller relevanten Nebenbedingungen und der Auswahl der in Frage kommenden Handlungsalternativen folgt die Zielanalyse. Hier wird das Zielsystem bestimmt. Das Zielsystem kann dabei qualitative und quantitative Ziele umfassen. Die Ziele sind Grundlage für die Bestimmung von Bewertungskriterien, nach denen die zuvor erarbeiteten Alternativen bewertet werden. Zur Erstellung des Zielsystems werden die Ziele nach sachlichen Aspekten in Gruppen zusammengefasst und in eine hierarchische Ordnung gebracht [129], [133]. Mit Hilfe geeigneter Größen als Gradmesser für die Zielerreichung müssen die einzelnen positiven und negativen Auswirkungen (Zielerträge, Teilwirksamkeiten) der alternativen Maßnahmen hinsichtlich des vorher definierten Zielsystems quantitativ ermittelt werden. Im Gegensatz zur KWA werden in der NWA die Teilwirksamkeiten zu einem Gesamtnutzwert zusammengeführt. Dies erfordert ein Umformen der einzelnen Teilwirksamkeiten, das heißt ein Normieren der Zielerträge, in Zielerfüllungsgrade mit einer einheitlichen Werteskala [23]. Danach erfolgt durch Multiplikation der Zielerfüllungsgrade der einzelnen Ziele mit den jeweiligen Zielgewichten eine Überführung in Teilnutzwerte. Der Gesamtnutzwert einer Handlungsalternative ergibt sich durch eine anschließende Aufsummierung der einzelnen Teilnutzwerte. Die so ermittelten Gesamtnutzwerte ermöglichen nach einer Sensitivitätsanalyse die Angabe einer Rangfolge für die einzelnen Alternativen. [139], [20], [133]. Das Rechenschema der Nutzwertanalyse ist in Tab. 4.1 zusammengefasst.

Tab. 4.1: Rechenschema der Nutzwertanalyse geändert nach [23]

Teilziele	Gewicht	Handlungsalternativen					
		A1			A2		
		Teil-wirksamkeit	Ziel-erfüllungs-grad	Teilnutzwert	Teil-wirksamkeit	Ziel-erfüllungs-grad	Teilnutzwert
Z ₁	g ₁	W ₁₁	e ₁₁	$n_{11} = g_1 \cdot e_{11}$	W ₁₂	e ₁₂	$n_{12} = g_1 \cdot e_{12}$
Z ₂	g ₂	W ₂₁	e ₂₁	$n_{21} = g_2 \cdot e_{21}$	W ₂₂	e ₂₂	$n_{22} = g_2 \cdot e_{22}$
Z ₃	g ₃	W ₃₁	e ₃₁	$n_{31} = g_3 \cdot e_{31}$	W ₃₂	e ₃₂	$n_{32} = g_3 \cdot e_{32}$
Summe der Gewichte	1	Nutzwert von A1		N ₁	Nutzwert von A2		N ₂

Die Nutzwertanalyse erlaubt es, Entscheidungen bei multidimensionalen Zielsetzungen in optimaler Weise abzubilden und Bewertungsprobleme in Bezug auf die unterschiedlichen Ziele in formal befriedigender Weise zu lösen. Zu den Vorteilen der NWA zählt, dass quantitative und qualitative Angaben kombiniert werden können. Außerdem kann sie relativ einfach und kostengünstig im Vergleich zur Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden [133]. Die schwache Einbeziehung der Kostenseite ist nachteilig. Bei Abbildung der Kosten als negative Teilnutzwerte mit entsprechender Gewichtung sei dieses Argument jedoch zu entkräften

[23]. Weiterführende Erläuterungen zur Nutzwertanalyse finden sich in [23], [133], [256], [129], [211], [31].

4.2.4 Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA)

Die Kosten-Wirksamkeitsanalyse ist neben der KNA und NWA eine weitere wichtige Methode zur Bewertung von Handlungsalternativen. Sie wird durchgeführt, wenn zur Lösung einer fest umrissenen Aufgabe innerhalb vorgegebener Beschränkungen mehrere Maßnahmen, Projekte oder Systeme zur Auswahl stehen. Auch sie wurde für den Zweck entwickelt, aus verschiedenen Alternativen die vorteilhafteste herauszufiltern. Die KWA kann lediglich Handlungsalternativen, die demselben Zielsystem dienen, untereinander vergleichen [23], [133]. Durch eine KWA lässt sich nur die relative Effizienz von Maßnahmen vergleichen. Eine Aussage zur absoluten Effizienz ist nicht möglich [20]. Wie bei der Nutzwertanalyse werden in der Kosten-Wirksamkeitsanalyse nur die Kosten monetarisiert. Auf eine vollständige Monetarisierung aller Effekte wird bewusst verzichtet. So können im Gegensatz zur KNA auch nicht-monetarisierbare Effekte in die Analyse einfließen [23]. Anwendung findet dieses Analyseinstrument demnach bei der Entscheidung über Maßnahmen, bei denen die Wirkungen nicht monetarisiert werden sollen, weil sich diese nicht vollständig monetär bewerten lassen oder beispielsweise aus ethischen Gründen nicht bewertet werden sollen [20], [133]. Das Vorgehen bei einer Kosten-Wirksamkeitsanalyse ist in Abb. 4.3 schematisch dargestellt.

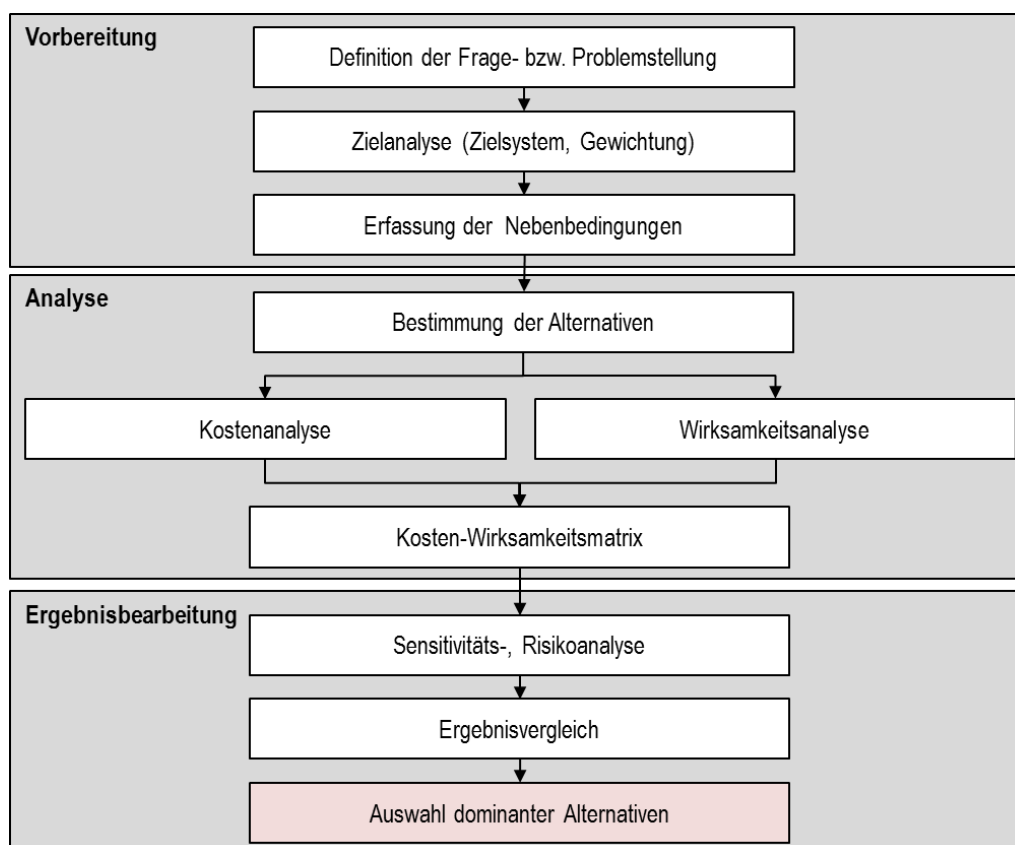


Abb. 4.3: Ablaufschema für eine Kosten-Wirksamkeitsanalyse geändert nach [23]

Der Analyseprozess beginnt mit der Problemdefinition [133]. Danach erfolgt die vollständige, widerspruchsfreie und messbare Erfassung der Ziele, die insgesamt erreicht werden sollen. Dieser Zielanalyse kommt übergeordnete Bedeutung zu, da die Vorteilhaftigkeit der Handlungsalternativen anhand der Erreichung dieser Ziele gemessen wird [23]. Sollen mehrere Ziele verwirklicht werden, ist ein ganzes Zielsystem zu bestimmen. Dazu werden zunächst die Ziele gesammelt und danach in Ober- und Unterziele gegliedert. So entsteht eine Zielhierarchie. Für die einzelnen konkretisierten Unterziele werden messbare Zielkriterien festgelegt, die die Erfassung der jeweiligen Zielerreichungsgrade ermöglicht. Die Zielkriterien ergeben sich aus den Anforderungen, die Entscheidungsträger und Experten an die Projekte stellen. Der Schritt endet mit der Gewichtung der konkretisierten Ziele zueinander [133]. Nach Erfassung aller relevanten Nebenbedingungen und Auswahl der in Frage kommenden Handlungsalternativen kann mit der eigentlichen Wirksamkeitsanalyse begonnen werden. Sie beschäftigt sich mit der Konstruktion von Größen für die einzelnen Teilziele und mit der Messung der verschiedenen Teilwirksamkeiten. Zur Bestimmung von Teilwirksamkeiten und zur Quantifizierung der Zielerreichungsgrade werden die Positionen der Teilwirksamkeiten auf einer geeigneten Wirksamkeitsskala ermittelt. Dabei kommen als Skalierungsarten grundsätzlich Nominal-, Ordinal- oder Kardinalskalen in Betracht. Nominalskalen nehmen nur qualitativ abgrenzbare Klasseneinteilungen, z. B. ja/nein oder befriedigend/unbefriedigend, vor. Hierdurch ist zwar eine rasche Einstufung der einzelnen Zielkriterien nach ihren Zielerfüllungsgraden möglich, jedoch ist ihre Aussagekraft auch relativ gering. Vergleichende Aussagen ermöglichen Maßzahlen, die sich auf einer Ordinalskala abbilden lassen, wie die Bewertung nach dem Schulnotensystem von 1 bis 6. Diese Maße kennzeichnen die Erfüllungsgrade einzelner Teilziele in einer vergleichenden Betrachtung mit Kriterien wie „höher als“, „geringer als“ oder „gleich“. Die aussagekräftigste Art der Skalierung stellt die Kardinalskalierung dar. Sie erlaubt die Messung des konkreten Ausmaßes der Wirksamkeitsunterschiede. Kosten-Wirksamkeitsanalysen sollten sich daher nach Möglichkeit auf kardinale Maßzahlen beziehen. Das Ergebnis der Wirksamkeitsanalyse wird in einer Wirksamkeits- oder Zielertragsmatrix dargestellt. In dieser Matrix wird für jede betrachtete Alternative und für jedes angestrebte Teilziel der Grad der Teilwirksamkeit eingetragen. Bei einer KWA wird nicht der Versuch unternommen, die einzelnen Teilwirksamkeiten zu einer Gesamtwirksamkeit zusammenzufassen. Diese Aufgabe obliegt den Entscheidungsträgern in Politik und Wirtschaft. Die KWA hat aber die Aufgabe, die erforderlichen Grundlagen für diese Entscheidung in einer möglichst transparenten Form zu liefern. Parallel zur Wirksamkeitsanalyse wird eine Kostenanalyse durchgeführt. Die Gesamtergebnisse der KWA werden schließlich in einer vollständigen Kosten-Wirksamkeitsmatrix zusammengefasst. Hierin erfolgt für die einzelnen Handlungsalternativen eine Gegenüberstellung der Teilwirksamkeiten und Kosten [23]. Die prinzipielle Form einer solchen Matrix zeigt Tab. 4.2. Nach Ordnung der Alternativen innerhalb

jeder einzelnen Teilwirksamkeit werden Sensitivitätsbetrachtungen zu den Bewertungsergebnissen durchgeführt. Hierdurch kann aufgezeigt werden, inwieweit Veränderungen der Wirksamkeitswerte, z. B. durch Änderung der Zielgewichtungen, Einfluss auf die Reihung der Alternativen haben [133]. Abschließend erfolgt die Gesamtbeurteilung durch Bestimmung einer Rangfolge der Handlungsalternativen. Da keine Gesamtwirksamkeiten gebildet werden, ist eine Reihung jedoch nur dann möglich, wenn alle oder zumindest die wichtigsten Teilwirksamkeiten eine hohe Rangziffer aufweisen und damit eine Alternative eindeutig als die dominanteste erkennbar ist [118], [133]. Dies ist jedoch nur selten der Fall. Hier liegen die Grenzen der Empfehlungskraft einer Kosten-Wirksamkeitsanalyse. Brunner et al. [23] erweiterten aus diesem Grund die klassische KWA um die Ermittlung einer Gesamtwirksamkeit. Ergebnis dieser modifizierten Kosten-Wirksamkeitsanalyse (mKWA) ist das Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis, das eine abschließende Reihung der Alternativen ermöglicht.

Tab. 4.2: Prinzipielle Form einer Kosten-Wirksamkeitsmatrix geändert nach [23]

Handlungsalternative	Kosten	Wirksamkeiten		
		Teilwirksamkeit 1	Teilwirksamkeit 2	Teilwirksamkeit 3
1	K ₁	W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃
2	K ₂	W ₂₁	W ₂₂	W ₂₃
3	K ₃	W ₃₁	W ₃₂	W ₃₃

Ein positiver Aspekt der KWA ist, dass im Gegensatz zur Nutzwertanalyse die monetäre Dimension nicht vernachlässigt wird [139]. Ein weiterer Vorteil der KWA ist, dass sie im Vergleich zur KNA methodisch einfacher ist und sich mit wesentlich geringerem Aufwand durchführen lässt [20], [133]. Sie ist dabei flexibel anwendbar, da sie jederzeit um weitere Eingangsparameter ergänzt bzw. deren Zielgewichtung variiert werden kann. Dies ermöglicht einen umfassenden Überblick über die zu erwartenden Auswirkungen einer Maßnahme. Die Kosten-Wirksamkeitsanalyse kann bei sehr weitreichenden Maßnahmen mit schwierig und vielfältig zu erfassenden Wirkungen, auch als Vorstufe anderer Methoden (KNA, NWA) dienen [23]. Weitergehende Ausführungen zur Kosten-Wirksamkeitsanalyse finden sich in [127], [20], [23], [139], [118], [133], [206], [34], [188].

4.3 Analyseinstrumente und Bewertungskriterien

4.3.1 Allgemeines

Zur Durchführung der oben beschriebenen Analysemethoden sind für die einzelnen Bewertungsdimensionen Materialqualitäten, Mensch und Umwelt sowie Wirtschaftlichkeit geeignete Instrumente und Bewertungskriterien erforderlich. Die für die vorliegende Arbeit erforderlichen Instrumente und Kriterien sind:

- bautechnische und umweltrelevante Anforderungswerte an die Materialqualität,
- die Stoffflussanalyse mit der Ermittlung von Material- und Energieflüssen,
- die Ökobilanzierung mit anerkannten Wirkungskategorien (Umweltwirkungen),
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mittels Erfassung von Kosten und Erlösen,
- Betrachtungen sozialer Aspekte.

Diese Instrumente und Kriterien werden mit Blick auf das in der Arbeit zu entwickelnde Bewertungskonzept nachfolgend näher beschrieben.

4.3.2 Materialqualitäten

Letztlich bestimmt die Materialqualität des Abbruchmaterials als limitierender Faktor das Anwendungsgebiet des daraus durch Aufbereitung erzeugten Recyclingbaustoffs. Die stofflichen, chemischen, physikalischen sowie umwelt- und gesundheitsrelevanten Anforderungswerte an die Recyclingbaustoffe finden sich in entsprechenden Vorschriften, Richtlinien und Normen. Eine Auswahl wichtiger Dokumente ist in Tab. 4.3 zusammengestellt.

Tab. 4.3: Ausgewählte Dokumente mit Anforderungen an RC-Baustoffe

Anwendungs- bzw. Anforderungsbereich	Vorschriften, Richtlinien und Normen
Beton/Mörtel	DIN 4226-100 [55], DIN EN 12620 [56]
Straßen- und Wegebau	TL Gestein-StB [234], TL SoB-StB [235]
Erdbau	ZTV E-StB [260], TL BuB E-StB [233]
Vegetationstechnik	FLL-Richtlinien [102], RAL-GZ 250 [194]
umweltrelevante Anforderungen	LAGA M 20 [156], [157], DIBt-Grundsätze [42]
gesundheitsrelevante Anforderungen	TRGS 900 [25], DIBt-Grundsätze [43]
Zusätzlich sind bundesländerspezifische Regelungen, insbesondere für umweltrelevante Anforderungen, zu beachten.	

Die in den Vorschriften, Richtlinien und Normen enthaltenen Grenzwerte bilden einen wichtigen Baustein in der Nachhaltigkeitsbewertung für die Lebensendphase von Mauerwerk. Insgesamt stellt das Einhalten dieser Grenzwerte eine Grundbedingung für die Anwendung von Recyclingbaustoffen dar. Darauf wird in Kap. 6.3 näher eingegangen.

4.3.3 Stoffflussanalyse (SFA)

Die Stoffflussanalyse (auch: Stoffstromanalyse) ist ein Instrument zur Abbildung von Stoffströmen (Material- und Energieflüsse) für ein definiertes Untersuchungssystem (z. B. Bauwerk, Baustoffproduktion, Abfallbewirtschaftung). Mit ihr werden die relevanten Stoffflüsse identifiziert sowie deren Eintrag, Austrag und Verbleib im System quantifiziert. Dadurch sollen die Ursachen der Stoffströme ermittelt und Reduktions- bzw. Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt werden [209].

Stoffflüsse können mit drei konzeptionellen Herangehensweisen beschrieben werden: stoffbezogen, produktbezogen oder prozessbezogen. Dabei liegen die Unterschiede im Raum- und Zeitbezug sowie in dem Ziel und Zweck der Analyse. Es wird von stoffbezogener Betrachtung gesprochen, wenn innerhalb räumlicher und zeitlicher Bilanzgrenzen sämtliche wesentliche Verzweigungen und Umwandlungen eines bestimmten Stoffes auf dessen Weg durch technische und natürliche Systeme dargestellt werden. In diesem Fall ist die Darstellung unabhängig von den mit der Erfüllung einer Funktion verbundenen Wirkungen. Stoff- und Energiebilanzen sind ein Beispiel für eine solche Herangehensweise. Sollen mit dem Untersuchungssystem hingegen die Herstellung, Nutzung und Entsorgung einzelner Produkte stärker hervorgehoben werden, so wird diese Variante der Stoffstromanalyse als produktbezogen bezeichnet. Auf eine räumliche und zeitliche Einschränkung in der Betrachtung wird dabei häufig verzichtet. Bei dieser Herangehensweise werden jedoch alle Materialien in die Analyse einbezogen, die für die Entstehung des Produktes relevant sind. Zudem rücken bei dieser Variante die mit einer bestimmten Funktion des Produkts verbundenen Wirkungen in den Vordergrund. Anwendungsbeispiel ist die Produktökobilanz. Liegt der Fokus der Analyse auf der Erfassung von den Ursachen der Stoffströme, so wird die Vorgehensweise als prozessbezogen gekennzeichnet. Hierbei sind wie bei der produktbezogenen Herangehensweise Raum und Zeit häufig unbestimmt. Die Wirkungsanalyse hat eine ebenso hohe Bedeutung. Beispiel für diese Vorgehensweise ist die Technikfolgenabschätzung [164], [133].

Die Abbildung von Material- und Energieflüssen erfolgt nach verschiedenen Modellen. Das einfachste Modell ist eine Input-Output-Betrachtung (Abb. 4.4). Der abgegrenzte Untersuchungsraum bildet eine Blackbox, in der die Verknüpfungen und Wechselwirkungen von Prozessen und Flüssen ausgeblendet bleiben. Nur die eintretenden und austretenden Flüsse werden erfasst und abgeschätzt. Der Transferkoeffizient beschreibt dabei den Anteil eines Inputstroms, der als Outputstrom den Untersuchungsraum wieder verlässt.

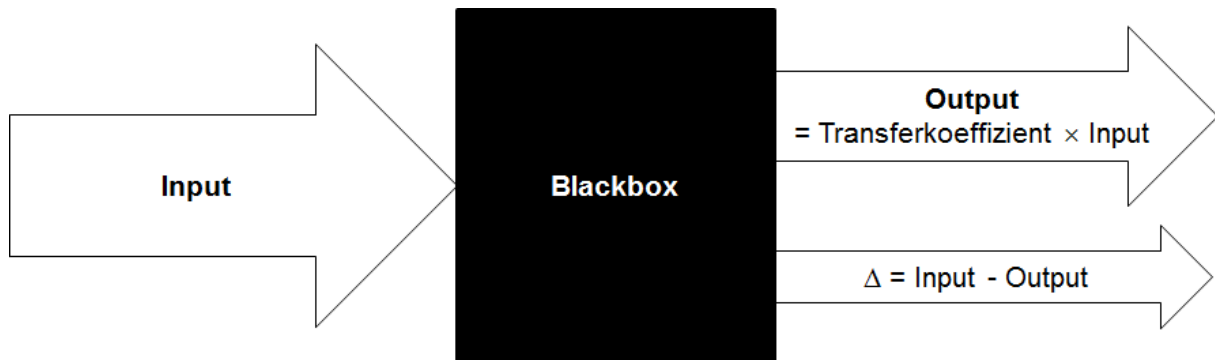


Abb. 4.4: Vereinfachtes Modell einer Stoffflussanalyse (Input-Output-Betrachtung)

Sollen die Ursachen der Stoffflüsse erforscht werden, müssen Modelle verwendet werden, die die Produktionsstruktur oder die Prozesse und Flüsse innerhalb des Untersuchungsraumes abbilden. Auf diesem Wege werden bei Zugrundelegung entsprechender Annahmen eine Szenarienbildung oder Prognoseerstellung möglich. Soll neben den Ursachen der Stoffströme auch die unter verschiedenen Handlungsalternativen optimale Lösung gesucht werden, so sind parametrisierte Modelle mit mathematischen Algorithmen heranzuziehen. Alle Modelle haben gemeinsam, dass die Stoff-, Material- und Energieflüsse in physikalischen Einheiten (z. B. kg, t, MJ, kWh) erfasst werden. Dies hat beispielsweise zur Konsequenz, dass Betriebs- und Hilfsstoffe, die in einer Kostenrechnung aufgrund ihrer monetären Geringwertigkeit meist nicht erfasst werden, unter ökologischen Gesichtspunkten besondere Beachtung erlangen können [209], [133].

Stoffflussanalysen können je nach Fragestellung eine eigenständige Methode oder Teil anderer Analyseinstrumente, wie Ökobilanzen, sein [4]. Ausführungen zu den Begriffen und der Methodik von Stoffflussanalysen in der Abfallwirtschaft finden sich in Teil 1 und Teil 2 der OENORM S 2096 [185], [186]. Festlegungen zur Stoffflussanalyse für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk werden in Kap. 6 und Kap. 7 getroffen.

4.3.4 Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA)

Der Einsatz von Sekundärrohstoffen ist eine Grundvoraussetzung für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft. Dabei muss in jedem Fall sichergestellt sein, dass mit ihrem Einsatz eine Entlastung der Umwelt verbunden ist. Höhere Preise gegenüber Primärrohstoffen und veränderte technische Eigenschaften sind bis zu einem Grad, der einzelfallbezogen zu betrachten ist, akzeptabel. Eine Mehrbelastung der Umwelt muss jedoch vermieden werden [153]. Für die Bewertung der Umweltwirkungen von Materialien und Prozessen in ökologischer Hinsicht ist die Ökobilanz das allgemein anerkannte Analyseinstrument.

Aufgabe der Ökobilanz ist es, die mit einem Produkt, System oder Verfahren in Verbindung stehenden Stoff- und Energieströme und deren Wirkungen auf Mensch und Umwelt zu erfassen, transparent aufzubereiten und zu beurteilen [208]. Sie werden nach den Grundsätzen und Anforderungen gemäß DIN EN ISO 14040 [71] und DIN EN ISO 14044 [72] erstellt. Die Ökobilanz gliedert sich hiernach in die folgenden Phasen:

1. Zieldefinition und Festlegung des Untersuchungsrahmens,
2. Sachbilanz,
3. Wirkungsabschätzung,
4. Auswertung.

Die einzelnen Phasen können nicht getrennt voneinander durchgeführt werden, da sie sich gegenseitig beeinflussen. Die Phasen einer Ökobilanz mit den dazugehörigen Wechselwirkungen sind in Abb. 4.5 schematisch dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

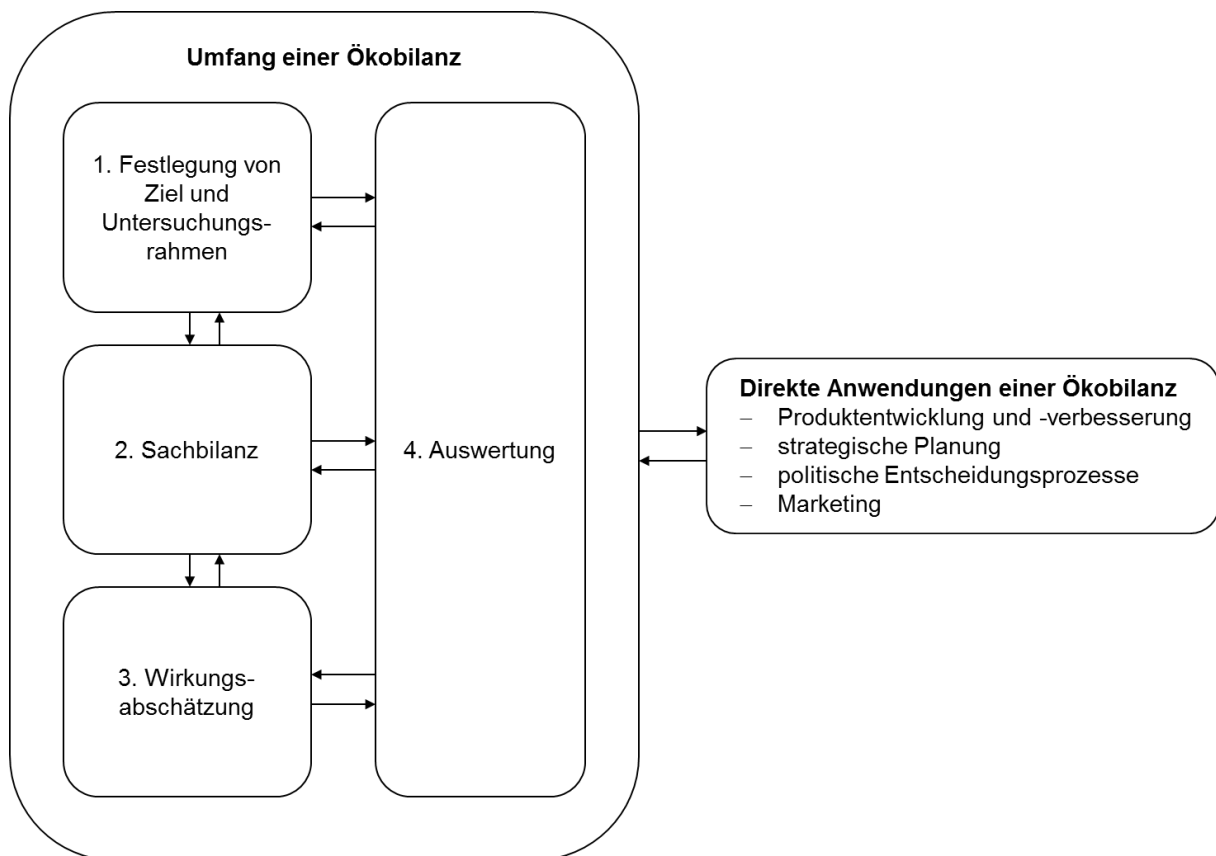


Abb. 4.5: Phasen einer Ökobilanz geändert nach DIN EN ISO 14040 [71]

In der ersten Phase der Ökobilanz wird der Geltungs- und Wirkungsbereich der ökologischen Bewertung eindeutig abgegrenzt. Dafür werden der Hintergrund der Ökobilanzstudie und das Ziel festgehalten. Gleichzeitig wird der Untersuchungsrahmen mit seinen räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen festgelegt und beschrieben. Zudem erfolgt die Auswahl der einzubeziehenden Wirkungskategorien sowie der für die beiden Arbeitsschritte Wirkungsabschät-

zung und Auswertung zu verwendenden Methoden [147], [214]. Darüber hinaus wird eine funktionelle Einheit definiert. Sie ist prinzipiell auf den folgenden Ebenen denkbar:

- Baustoff (z. B. 1 m³ Mauersteine),
- Bauteil (z. B. 1 m² Außenwand),
- Gebäude (z. B. 1 Einfamilienhaus),
- Gebäudenutzen (z. B. 1 m² Wohnfläche).

Die funktionelle Einheit fungiert als Bezugseinheit der in der Sachbilanz erfassten Daten (Sachbilanzgrößen). Dieser Bezug bleibt auch in der späteren Wirkungsabschätzung bestehen. Erst die funktionelle Einheit lässt vergleichende Aussagen zu. Das Ergebnis einer Ökobilanzstudie ist demnach nur in Abhängigkeit von der funktionellen Einheit zu sehen [153], [100]. Dies muss insbesondere beim Vergleich unterschiedlicher Ökobilanzstudien beachtet werden.

Nach den grundlegenden Festlegungen in der ersten Phase folgt die Sachbilanz (Abb. 4.5). Mit ihr werden nun sämtliche Stoff- und Energieströme innerhalb der festgelegten Systemgrenzen in physikalischen Einheiten als Input- und Outputflüsse erfasst [133], [141]. Zu den Inputflüssen gehört der Verbrauch von stofflichen, energetischen und räumlichen Ressourcen. Outputflüsse sind das hergestellte Produkt sowie entstehende Reststoffe und Emissionen. Diese Sachbilanzgrößen bilden die Grundlage für die sich anschließende Wirkungsabschätzung [249].

Bei der Wirkungsabschätzung (Abb. 4.5) werden die in der Sachbilanz ermittelten Umweltwirkungen beurteilt und bewertet [100]. Nach DIN EN ISO 14040 [71] stehen dafür verschiedene Methoden zur Verfügung. Zu den bekanntesten Methoden zählt die CML-Methode, die vom Centre for Environmental Science der Universität Leiden (CML 2001) erarbeitet wurden [126], [121], [116]. Hiernach werden Sachbilanzgrößen mit gleicher Umweltwirkung in einer Wirkungskategorie zusammengefasst. Diese Zuordnung wird als Charakterisierung bezeichnet. Im Vordergrund stehen dabei die Kategorien, Treibhauseffekt, Versauerung von Böden und Gewässern, Ozonabbau sowie Nährstoffeinträge in Böden und Gewässer, Sommersmog und Ressourcenverbrauch. In den einzelnen Wirkungskategorien gibt es eine Leitgröße, auf den die betreffenden Sachbilanzgrößen umgerechnet und zu einem Wirkungsindikator zusammengefasst werden. Dies wird Eine Auswahl von Wirkungskategorien mit dazugehörigen Sachbilanzgrößen und Wirkungsindikatoren ist in Tab. 4.4 zusammengestellt. Dabei werden Stoffe, die auf unterschiedliche Weise die Umwelt beeinflussen können, mehreren Wirkungskategorien zugeordnet. So hat beispielsweise Methan sowohl Auswirkungen auf den Treibhauseffekt als auch auf die Bildung von Sommersmog [93], [249].

Tab. 4.4: Auswahl von Wirkungskategorien mit Sachbilanzgrößen und Wirkungsindikatoren

Wirkungskategorie	Sachbilanzgröße	Wirkungsindikator	Leitgröße	Einheit
Globale Erwärmung, auch: Treibhauswirkung, Treibhauseffekt)	Emissionen, die den Wärmehaushalt der Atmosphäre beeinflussen (Treibhausgase wie Kohlendioxid und Methan)	Globales Erwärmungspotenzial, auch: Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP)	Kohlen-dioxid	CO ₂ -Äquivalent
Versauerung von Boden und Gewässern	Emissionen, die eine Versauerung von Boden und Gewässern verursachen (z. B. Schwefelsäure)	Versauerungspotenzial (Acidification Potential, AP)	Schwefel-säure	SO ₂ -Äquivalent
Ozonabbau	Emissionen in die Luft, die die troposphärische Ozonschicht abbauen (überwiegend Fluorchlor-kohlenwasserstoffe)	Ozonabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential, ODP)	Trichlor-fluor-methan	CCl ₃ F-Äquivalent (R11-Äquivalent)
Eutrophierung von Gewässern	Emissionen, die eine Überdüngung von Gewässern bewirken können (Phosphor- und Stickstoffverbindungen)	Eutrophierungspotenzial, auch: Überdüngungspotenzial (Nutrification Potential, NP)	Phosphat, Stickoxide	PO ₄ ³⁻ -Äquivalent, NO _x -Äquivalent
Photochemische Ozonbildung, auch: Sommersmog	Emissionen in die Luft, die als Ozonbildner in Bodennähe fungieren (überwiegend flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen)	Photooxidantienbildungspotenzial, auch: Sommersmogpotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP)	Ethen	C ₂ H ₄ -Äquivalent
Verbrauch stofflicher, energetischer und räumlicher Ressourcen	für die Herstellung eines Produkts benötigten Primär- und Sekundärrohstoffe	Menge der eingesetzten Primär- und Sekundärrohstoffe	Masse	kg
	für Herstellung, Lagerung, Verkauf, Transport und Entsorgung eines Produkts aufzuwendenden Energiemengen	Energieverbrauch	kumulierter Energieaufwand (KEA), erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergie (PEI)	MJ
	bei Abbau und Lagerung stofflicher Ressourcen und für Entsorgung benötigte natürliche Flächen	Naturraumbeanspruchung, auch: Flächeninanspruchnahme, Flächenverbrauch	Fläche	m ²

Gegenwärtig bestehen zwar für mehrere Umweltwirkungen bereits gesicherte und international anerkannte Regeln. Für andere relevante Umweltwirkungen sind diese noch Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion [126]. Dazu gehören insbesondere Toxizitätspotenziale sowie die Inanspruchnahme von Naturraum. Letztlich können in der Wirkungsbilanz nur solche Umweltwirkungen abgeschätzt werden, für die in der Sachbilanz Daten erfasst wurden [153]. So lassen sich Umweltwirkungen, wie Staub, Lärm, Geruch oder aber auch Erschütterungen, nur schwer erfassen und können nicht in ihrer Wirkung abgeschätzt werden. Momentan sind für die praktische Durchführung von Ökobilanzen die folgenden international anerkannten Wirkungsindikatoren als sinnvoll zu erachten: Treibhauspotenzial, Versaue-

ungspotenzial, Ozonabbaupotenzial, Eutrophierungspotenzial sowie Photooxidantienbildungspotenzial [100]. Ergänzt werden diese Indikatoren durch den Energieverbrauch.

Auf Basis der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung erfolgt abschließend eine Auswertung der Ökobilanzergebnisse (Abb. 4.5). Für die ökobilanzielle Bewertung von Baustoffen werden dabei meist die Umweltwirkungen verschiedener Baustoffe untereinander oder mit Baustoffen, die aus Sekundärrohstoffen hergestellt wurden, verglichen. Daraus können dann Produkt- oder Prozessschwachstellen abgeleitet werden [249]. Die Ökobilanz kann somit der Produktentwicklung und -verbesserung, der strategische Unternehmensplanung, der Unterstützung politischer Entscheidungsprozesse und dem Marketing dienen (Abb. 4.5).

Darüber hinaus bildet die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 [71] und DIN EN ISO 14044 [72] die Grundlage für weitere Ansätze der ökologischen Bewertung von Produkten und/oder der Bereitstellung von Umweltinformationen, wie für Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declaration, EPD) nach DIN EN ISO 14025 [70], und damit indirekt zur Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden [37] der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB e.V.). EPDs ermöglichen die Beschreibung der mit einem Produkt verbundenen ökologischen Wirkungen. Neben den klassischen Umweltkennzeichen, wie dem „Blauen Engel“ (Typ-I-Deklaration nach DIN EN ISO 14024 [69]) und Selbstdeklarationen von Produktherstellern (Typ-II-Deklaration nach DIN EN ISO 14021 [68]) stellen die EPDs als Typ-III-Deklaration eine extern zertifizierte und geprüfte Datengrundlage zur ökologischen Beurteilung von Produkten dar [255]. Die Grundsätze dieser Umweltkennzeichen und Deklarationen sind in der DIN EN ISO 14020 [67] festgelegt. In Deutschland stellt das IBU Institut Bauen und Umwelt e.V. [132] ein Schema zur Erstellung und Zertifizierung von EPD für Bauprodukte bereit [255]. Regeln für EPDs liefert die DIN EN 15804 [58]. Sie stellt sicher, dass die Umweltproduktdeklarationen von Bauprodukten, Dienstleistungen im Bausektor und Bauprozessen in einheitlicher Weise erstellt, geprüft und dargestellt werden [152]. In Abb. 4.6 ist die Einordnung der EPDs im Lebenszyklus von Gebäuden gemäß [58] dargestellt. Hiernach nehmen sie Bezug auf die Lebenswegmodule A1 bis A3 der Herstellungsphase. Als zentrale Sammelstelle für EPDs von Bauprodukten dient die Datenbank Ökobau.dat [28]. Sie ist eine vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) finanzierte Basisdatenbank mit durchschnittlichen Ökobilanzdaten typischer Bauprodukte. Die Datenbank wurde von der PE INTERNATIONAL AG auf Basis der GaBi-Datenbank für Ökobilanzdaten [190] erstellt. Die Ökobau.dat dient der Gebäudezertifizierung nach den Regeln der DGNB und der Gebäudebewertung nach den Regeln des BMUB als verpflichtende Datengrundlage zur Erstellung von Ökobilanzen für Gebäude [254].

Weiterführende Beschreibungen zur Ökobilanzierung erfolgen in [71], [72], [99], [100], [141], [97], [98]. Festlegungen zur Ökobilanzierung für die Lebensendphase von Mauerwerk werden in Kap. 6 und Kap. 7 getroffen.

Lebenszyklusmodule				
A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	D
Herstellungsphase	Errichtungsphase	Nutzungsphase	Entsorgungsphase	Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen
A1 Rohstoff-bereitstellung A2 Transport A3 Herstellung	A4 Transport A5 Bau/Einbau	B1 Nutzung B2 Instandhaltung B3 Reparatur B4 Ersatz B5 Umbau/ Erneuerung	C1 Abbruch C2 Transport C3 Abfallbewirt-schaftung C4 Deponierung	D Wiederver-wendungs-, Rückgewinnungs- und Recycling-potenzial
Umweltprodukt-deklaration (EPD)		B6 Betrieblicher Energieeinsatz		
		B7 Betrieblicher Wassereinsatz		

Abb. 4.6: Umweltproduktdeklaration im Lebenszyklus von Gebäuden nach DIN EN 15804

4.3.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Die Umsetzung von technisch machbaren und ökologisch sinnvollen betrieblichen Prozessen bzw. Verfahren sowie die Markteinführung dabei hergestellter Produkte erfolgen nur dann, wenn dies auch wirtschaftlich erfolgversprechend ist. Die Entscheidung darüber erfordert eine ökonomische Bewertung. Die Beurteilung ökonomischer Auswirkungen erfolgt über Wirtschaftlichkeitsberechnungen, die im Wesentlichen über Kosten-Erlös-Betrachtungen geführt werden. Ökobilanzielle und ökonomische Bewertungen müssen dabei systematisch aufeinander abgestimmt sein [166]. Bei der ökonomischen Analyse sind vielfältige Kenngrößen zu berücksichtigen. Dazu gehören prozessbezogene Angaben, fixe und variable Kosten sowie Erlöse bzw. Preise. In Tab. 4.5 ist eine Auswahl ökonomischer Kenngrößen zusammengestellt. Nur wenn die über die ermittelten Preise erzielbaren Erlöse die Herstellungskosten übersteigen, sind Produkt bzw. Herstellungsverfahren auch marktfähig und wirtschaftlich [214], [197].

4.3.6 Betrachtung sozialer Aspekte

Die Quantifizierung sozialer Aspekte bei der Bewertung von Produkten und Prozessen befindet sich noch in der Entwicklung. Die Forschung konzentriert sich momentan auf eine Betrachtung der durch das Arbeitsumfeld bedingten Auswirkungen. Dazu gehören die Anzahl von schweren oder tödlichen Unfällen und das Qualifikationsprofil der Arbeitskräfte an Pro-

duktions- und Entsorgungseinrichtungen. Die Methode der lebenszyklusbasierten Betrachtung von Wirkungen des Arbeitsumfelds (Life Cycle Working Environment, LCWE) entspricht dabei weitestgehend den Anforderungen und Empfehlungen des Leitfadens zur Erstellung lebenszyklusbasierter Sozialanalysen der UNEP/SETAC Life Cycle Initiative [16], [126].

Tab. 4.5: Auswahl ökonomischer Kenngrößen bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Kenngröße	Einheit
prozessbezogene Angaben (z. B. Spezifikation Bauschuttaufbereitungsanlage)	
Lebensdauer	[a]
Verzinsung	[%]
Anlagenkapazität	[t/a]
Auslastung der Anlage	[%]
Durchsatz (Nennleistung)	[t/h]
Fixe Kosten in [€] oder [€/a]	
Investitionskosten inkl. Verzinsung	[€]
Infrastrukturkosten inkl. Verzinsung	[€]
Grundstücks-/Pachtkosten	[€/a]
Personalkosten	[€/a]
Vertriebs- und Verwaltungskosten	[€/a]
Laborkosten	[€/a]
Variable Kosten in [€/t] oder [€/a]	
Materialkosten, z. B. Einkauf Aufgabegut	[€/t]
Betriebskosten	[€/a]
Reparatur- und Verschleißkosten	[€/a]
Entsorgungskosten	[€/a]
Transportkosten	[€/t]
Erlöse/Preise in [€/t] (z. B. für Bauschuttannahme und Recyclingbaustoff)	
Gewinn/Verlust in [€/t]	

5 Bisherige Arbeiten zur Bewertung der Lebensendphase von Bauwerken

Eine Auswahl von bisherigen Arbeiten zur Lebensendphase von Bauwerken ist in Tab. 5.1 zusammengestellt. Im Fokus der gewählten Darstellung steht der Untersuchungsumfang der verschiedenen Arbeiten mit Angabe der betrachteten Planungsschritte und Materialien sowie der berücksichtigten Nachhaltigkeitsaspekte.

Insgesamt ergeben die einzelnen ökobilanziellen und ökonomischen Untersuchungen, dass es keine allgemeingültigen Empfehlungen zur Gestaltung der Lebensendphase von Mauerwerk geben kann. Es wird immer eine lokal- bzw. regionalbedingte Einzelfallentscheidung bleiben, die wesentlich durch komplexe verfahrens- und materialtechnische, umweltbezogene und wirtschaftliche Rahmenbedingungen geprägt wird. Eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk bedarf demnach einer umfassenden Betrachtung, die alle Nachhaltigkeitsaspekte und Planungsschritte einbezieht. Die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten von rückgebauten Mauersteinen und Mauerwerkbruch ist dabei ebenfalls zu berücksichtigen. Zu Vergleichszwecken wird der Mindestumfang ganzheitlicher Betrachtungen zur Lebensendphase von Mauerwerk ebenfalls in Tab. 5.1 aufgenommen.

Im Bereich von Abbruch und Aufbereitung ist ein breites Spektrum an Technologien vorhanden. Diese Individualität und Komplexität der Anlagentechnik erschweren die Planung aber auch die Bewertung der Lebensendphase von Bauwerken und Bauprodukten. Grundlegende Fragen zur Abbruch- und Aufbereitungstechnik sind eng verbunden mit den späteren Anwendungsbereichen von RC-Baustoffen. Gleichzeitig existieren für jeden Anwendungsbe- reich eigene Anforderungsparameter mit teilweise eigenen Prüfverfahren.

Trotz der Vielfalt von Anwendungsmöglichkeiten für Bauschutt bzw. Mauerwerkbruch und umfassender Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet (vgl. Tab. 2.15) beschränken sich bisherige ökobilanzielle und ökonomische Betrachtungen im Wesentlichen auf eine Anwendung von RC-Baustoffen als rezyklierte Gesteinskörnung für den Erd- und Straßenbau oder für die Betonproduktion. Andere Anwendungsmöglichkeiten wurden bisher trotz technischer Machbarkeit nicht in derartige Betrachtungen einbezogen. Zudem werden im Bereich der Materialqualitäten hauptsächlich Kriterien zur Umweltverträglichkeit der RC-Baustoffe analysiert und bewertet. Die bautechnischen Eigenschaften fließen in solchen Fällen nur am Rande mit ein.

Tab. 5.1 zeigt auch, dass bei Betrachtungen zur Lebensendphase von Bauwerken häufig nicht alle Teilaspekte der Nachhaltigkeit und Teilschritte der Planung berücksichtigt werden.

Einem ganzheitlichen Bewertungsansatz wird so nicht entsprochen. Darüber hinaus beziehen sich die meisten Arbeiten auf den Gesamtstrom Bauschutt. Ein direkter Bezug von Bauschutt allgemein auf Mauerwerkrestmassen ist jedoch nicht durchgängig möglich. Ein Großteil der bisherigen Arbeiten setzt erst bei bereits durchgeführten Abbruchvorhaben an. Etwaige Vorabbewertungen im Rahmen der Planung von Abbruchprojekten ist nicht Inhalt der aufgeführten Arbeiten. Zudem beschränkt sich die Bewertung verschiedener Szenarien untereinander zumeist auf den Vergleich einzelner ermittelter Werte. Eine zusammenfassende Bewertung über alle ermittelten Werte hinweg erfolgt lediglich als umschreibende Auswertung. Eine abschließende Reihung der Szenarien erfolgt dabei nicht.

Aus diesen Lücken im Bearbeitungsstand erschließt sich der Bedarf nach einem multidimensionalen Konzept zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung bei der Planung von Abbruchprojekten im Mauerwerksbau. Das ist Gegenstand dieser Arbeit. Auf Grundlage der vorangegangenen Kapitel wird nachfolgend das eigene ganzheitliche Bewertungskonzept erarbeitet. Die zusammengestellten verfahrenstechnischen Grundlagen zur Lebensendphase von Mauerwerk und die methodischen Grundlagen zur Bewertung von Prozessen und Produkten bilden dabei wichtige Bausteine.

Tab. 5.1: Auswahl bisheriger Arbeiten zur Lebensendphase von Bauwerken

Quellen	Untersuchungsumfang											Kurzbeschreibung	
	Planungs-schritt			Bewertungsdimension				Material		Betrachtungs-ebene			
	Abbruch	Aufbereitung	Anwendung	Materialqualität		Wirtschaftlichkeit	Umweltwirkungen	Bauschutt	Mauerwerkbruch	Baustoff (z. B. Gesteinskörnung für Beton)	Bauteil (z. B. Betondecke)		Bauwerk (z. B. Gebäude)
				Umwelt	Bautechnik								
				✓	✓	✓	✓						
vgl. Tab. 3.16, Spalte „Quellen“			✓		✓				✓	✓			verschiedene Untersuchungen zur Verwendung und Verwertung von Mauerwerkbruch in unterschiedlichen Materialqualitäten (von sortenrein bis gemischt; Mauerziegel, Kalksandstein, Porenbetonstein, Leichtbetonstein) in den Anwendungsfeldern Mauersteinproduktion, Erdbau, Straßen- und Wegebau, Deponiebau, Sportplatzbau, Vegetationstechnik sowie Betonproduktion
[119]			✓	✓					✓	✓			Untersuchung der Umweltverträglichkeit von Mauerwerkbaustoffen bezüglich ihrer Wiederverwertung.
[212]		✓	✓	✓	✓				✓	✓			Untersuchungen zur Herstellung von leichten Gesteinskörnungen für Beton aus Mauerwerkbruch mittels thermischer und hydrothormaler Aufbereitungsverfahren
[158]		✓	✓		✓				✓	✓			Untersuchung und Darstellung verschiedener Aufbereitungstechnologien und Anwendungsbereiche für Ziegelbruch und Sanitärkeramik
[95]		✓			✓				✓	✓			Untersuchungen zur Sortierbarkeit heterogener Abbruchmassen aus Mauerziegel, Kalksandstein, Porenbeton und Leicht- und Normalbeton mittels Nahinfrarot-Technik
[153]		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓	Ökobilanzierung für das Recycling von Konstruktionsleichtbeton als rezyklierte Gesteinskörnung für Leichtbeton
[162], [163]	✓					✓		✓	✓			✓	wirtschaftlicher Vergleich von konventionellem und selektivem Abbruch von Gebäuden in Ziegelbauweise
[159], [176]		✓			✓				✓	✓			Untersuchung verschiedener Aufschlussverfahren zur Trennung von Verbundkonstruktionen im Mauerwerkbau
[126]		✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓			Nachhaltigkeitsanalyse (Ökologie, Ökonomie und Soziales) für verschiedene Anlagenkonfigurationen zur Aufbereitung von Mauerwerkbruch unterschiedlicher Materialqualitäten (von sortenrein bis gemischt) und dessen Anwendung in unterschiedlichen Bereichen (Erd- und Straßenbau, Betonproduktion, Sportplatzbau) unter Berücksichtigung aller Hauptmauersteinarten
[113], [112]	✓						✓					✓	Nachhaltigkeitsanalyse für Ein- und Zweifamilienhäuser aus Mauerwerk
[225]	✓					✓		✓		✓	✓	✓	Zusammenstellung einer grundlegenden Datenbasis für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zum Rückbau von Gebäuden

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite.

Tab. 5.1: Auswahl bisheriger Arbeiten zur Lebensendphase von Bauwerken (Fortsetzung)

Quellen	Untersuchungsumfang												Kurzbeschreibung
	Planungs-schritt			Bewertungsdimension				Material		Betrachtungs-ebene			
	Abbruch	Aufbereitung	Anwendung	Materialqualität		Wirtschaftlichkeit	Umweltwirkungen	Bauschutt	Mauerwerkbruch	Baustoff (z. B. Gesteinskörnung für Beton)	Bauteil (z. B. Betondecke)	Bauwerk (z. B. Gebäude)	
				Umwelt	Bautechnik								
				✓	✓	✓	✓						
[236]	✓					✓						✓	verfahrenstechnische und ökonomische Bewertung von Abbruchverfahren im Industriebau
[29]	✓					✓						✓	Arbeitszeitstudien zum Einsatz verschiedener Hydraulikbagger mit unterschiedlichen Anbaugeräten beim Abbruch von Stahlbeton- und Mauerwerksbauten
[197], [144]	✓					✓		✓		✓		✓	wirtschaftlicher Vergleich von konventionellem und selektivem Abbruch von Gebäuden
[219], [222], [227]	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	Betrachtungen zur Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden unter Berücksichtigung umweltrelevanter (Schad- und Störstoffe), verfahrenstechnischer (Abbruch/Aufbereitung) und wirtschaftlicher Gesichtspunkte
[250]	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		ökobilanzielle Untersuchungen zur Optimierung von Gebäudeabbruch und Bauschuttaufbereitung mit Blick auf eine Sulfatentrachtung und eine Bauschuttverwertung in der Betonproduktion als rezyklierte Gesteinskörnung
[183]		✓	✓		✓	✓		✓		✓			Entwicklung einer Methodik zur Konfiguration gewinnmaximaler Bauschuttaufbereitungsanlagen unter Berücksichtigung der stofflichen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials, der verfügbaren Anlagentechnik und einer Anwendung im Erd- und Straßenbau und bei der Betonproduktion
[249]		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓			ökobilanzielle und ökonomische Untersuchung zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinentechnik zur Verwertung als rezyklierte Gesteinskörnung in Beton
[103]		✓	✓				✓	✓		✓	✓	✓	Untersuchung zum ökologischen Vorteil des Einsatzes von RC-Baustoff als Gesteinskörnung im Straßenbau im Vergleich zu Primärrohstoffen
[248]		✓	✓		✓		✓	✓		✓	✓		ökobilanzielle Untersuchung der Betonherstellung mit und ohne rezyklierte Gesteinskörnung aus Bauschutt
[33]	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓			Bewertung unterschiedlicher Szenarien für die Behandlung von Bauschutt (konventioneller oder selektiver Abbruch, unterschiedliche Aufbereitungstechniken, Anwendung als Gesteinskörnung im Hoch- oder Tiefbau)
[207]			✓		✓		✓	✓		✓			Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen durch die Verwertung von Bauschutt als Gesteinskörnung für Beton unter Berücksichtigung von Angebot und Nachfrage von RC-Baustoffen
[165]		✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓			Ermittlung von Substitutionspotenzialen von primären Gesteinskörnungen durch RC-Baustoffe im Erd- und Straßenbau und bei der Betonproduktion unter technisch-qualitativen und ökonomischen Gesichtspunkten

6 Erarbeitung des eigenen Bewertungskonzepts

6.1 Untersuchungsgegenstand, Bewertungsansatz und Analysemethode

Die Erarbeitung des eigenen Bewertungskonzepts beginnt mit der Festlegung des Untersuchungsgegenstandes sowie der Auswahl eines geeigneten Bewertungsansatzes und einer geeigneten Analysemethode (Abb. 6.1). Den Untersuchungsgegenstand der Arbeit bilden der Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk. Bei der Planung und Bewertung von Abbruchprojekten im Mauerwerksbau spielen komplexe baustoff- und anlagentechnische, umwelt- und gesundheitsbezogene sowie wirtschaftliche Fragestellungen eine Rolle. Das erfordert eine strukturierte Betrachtung der sich gegenseitig beeinflussenden Planungsschritte Abbruch und Aufbereitung unter Berücksichtigung der Anwendungsbereiche von Mauerwerkbruch (Abb. 1.1). Eine isolierte Betrachtung der einzelnen Planungsschritte ist, wie die bisherigen Arbeiten [227], [220], [111], [103], [219] zeigen, nur begrenzt zielführend. Aus diesem Grund wird vorliegend ein sukzessiver Bewertungsansatz gewählt, bei dem das multidimensionale Gesamtproblem „Abbruch und Aufbereitung von Mauerwerk“ in Teilprobleme aufgegliedert wird. Als Teilprobleme werden hier ausgehend von der EU-Abfallrahmenrichtlinie [3], dem Kreislaufwirtschaftsgesetz [104] und der EU-Bauproduktenverordnung [96] die Bewertungsdimensionen „Materialqualitäten“, „Mensch/Umwelt/Ressourcen“ sowie „Wirtschaftlichkeit“ identifiziert. Die Lösung dieser Teilprobleme erfolgt über eine integrierte Betrachtung der Planungsschritte Abbruch und Aufbereitung unter Berücksichtigung der Anwendung. Eine derart umfassende Bewertung gestattet nur die Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA) mit der Erweiterung um das Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis nach Brunner et al. [23] (Kap. 4.2). Sie erlaubt eine abschließende Gegenüberstellung der gesundheits-, umwelt- und ressourcenbezogenen Auswirkungen mit den wirtschaftlichen Aufwendungen. Die KWA wird deshalb als Basis für das hier zu erarbeitende Konzept herangezogen. Notwendige Festlegungen bezogen auf den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk werden getroffen. Zudem wird die gewählte Analysemethode um die folgenden Analyseinstrumente ergänzt: Stoffflussanalyse einschließlich Ökobilanzierung, Betrachtung sozialer Aspekte und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (Kap. 4.3).

Ausgehend von den methodischen Festlegungen (Abb. 6.1) wird nun das eigene Bewertungskonzept erarbeitet. Die Erarbeitung umfasst die in Abb. 6.2 schematisch zusammengestellten Schritte, die in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert werden. Das Ergebnis ist ein eigenes strukturiertes und methodisches Konzept, das erstmalig eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk bei der Planung von Abbruchprojekten erlaubt (Kap. 6.8) [122].

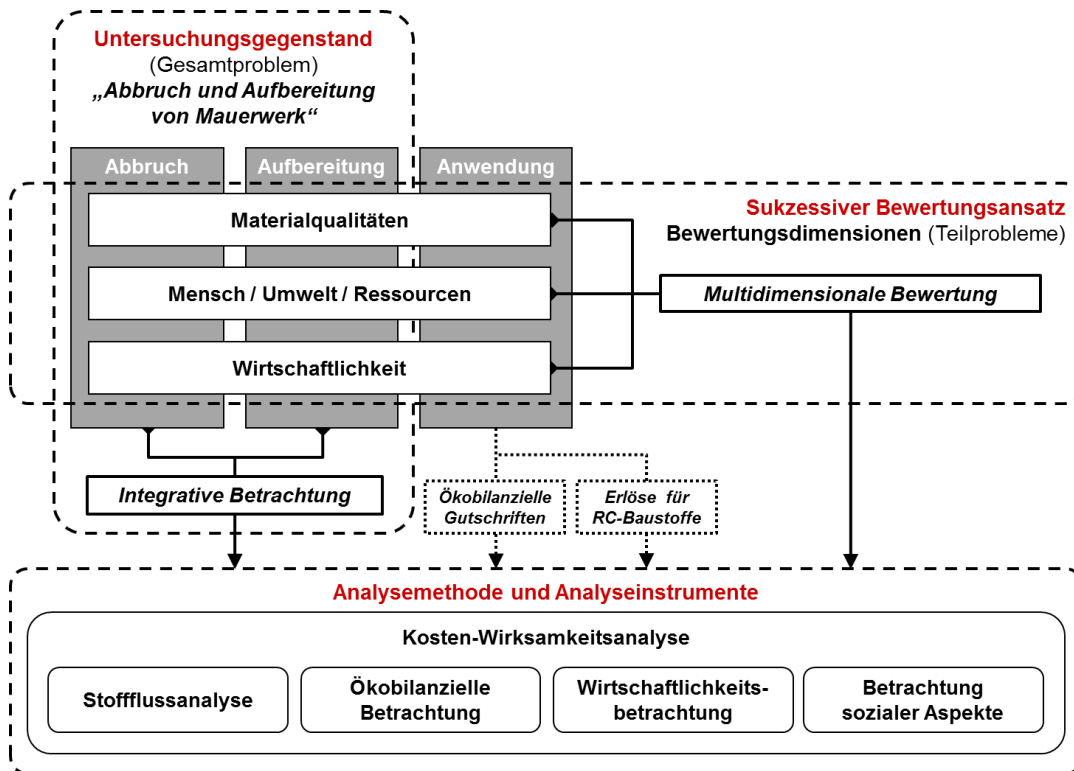


Abb. 6.1: Untersuchungsgegenstand der Arbeit, Bewertungsansatz und Analysemethode



Abb. 6.2: Erarbeitungsschritte für das eigene Bewertungskonzept auf Basis der KWA

6.2 Zielanalyse für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk

Ausgangspunkt einer Kosten-Wirksamkeitsanalyse ist die Zielanalyse (Abb. 6.2), in der ein klares und der Aufgabenstellung entsprechendes hierarchisches Zielsystem festgelegt wird. Alle Ergebnisse der Kosten-Wirksamkeitsanalyse und die daraus folgenden Aussagen werden stets auf dieses Zielsystem bezogen. Das für den Abbruch und Aufbereitung von Mauerwerk entwickelte Zielsystem basiert auf den Maßgaben der EU-Abfallrahmenrichtlinie [3], dem Kreislaufwirtschaftsgesetz [104] und der EU-Bauproduktenverordnung [96]. Die maßgeblichen Passagen aus den genannten Rechtsakten enthält Anhang 11.1. Hieraus werden als oberste Ebene im Zielsystem folgende Generalziele abgeleitet:

- **Generalziel Z1 „Schutz von Mensch und Umwelt“:** Das Generalziel Z1 adressiert die Bewertungsdimension „Mensch/Umwelt/Ressourcen“ (Abb. 6.1). Im Mittelpunkt stehen hier die im Rahmen des Abbruchs und der Aufbereitung auftretenden Umweltwirkungen, wie Treibhauspotenzial und Sommersmog, sowie Aussagen zum Arbeitnehmerschutz. Im Rahmen der Wirksamkeitsanalyse werden die Umweltwirkungen quantifiziert, die durch Abbruch, Aufbereitung und Transport entstehen. Zudem werden die Umweltwirkungen ausgewiesen, die durch die Anwendung von Sekundärrohstoffen aus Mauerwerkbruch und die Verwertung von aussortierten Fremdstoffen vermieden werden können. Die Umweltverträglichkeit der RC-Baustoffe (umweltrelevante Anforderungen zum Grundwasser- und Bodenschutz) wird an dieser Stelle nicht einbezogen. Weitere Erläuterungen zur Thematik Umweltverträglichkeit erfolgen in Kap. 6.3.
- **Generalziel Z2 „Ressourcenschonung“:** Das Generalziel Z2 adressiert die Bewertungsdimension „Mensch/Umwelt/Ressourcen“ (Abb. 6.1). Angesichts der Verknappung stofflicher, energetischer und räumlicher Ressourcen wird mit Generalziel Z2 die Schonung dieser Ressourcen in die Bewertung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk einbezogen. Zur Beurteilung werden einerseits die Ressourcen quantifiziert, die bei Abbruch, Aufbereitung und Transport verbraucht werden. Andererseits werden die Ressourcen ausgewiesen, die durch den Einsatz von RC-Baustoffe aus Mauerwerkbruch und die stoffliche oder thermische Verwertung von Fremdbestandteilen, wie Eisen und Kunststoffe, eingespart bzw. zusätzlich gewonnen werden können. Die Quantifizierung erfolgt gemeinsam mit Generalziel Z1 im Rahmen der Wirksamkeitsanalyse.
- **Generalziel Z3 „Ausreichende Materialqualität“:** Das Generalziel Z3 adressiert die Bewertungsdimension „Materialqualitäten“ (Abb. 6.1). An die Materialqualität der RC-Baustoffe werden Anforderungen gestellt, deren Einhaltung eine wesentliche Anwendungsvoraussetzung für RC-Baustoffe darstellt.
- **Generalziel Z4 „Wirtschaftlichkeit“:** Das Generalziel Z4 adressiert die Bewertungsdimension „Wirtschaftlichkeit“ (Abb. 6.1). Die Umsetzung von technisch machbaren und ökologisch sinnvollen betrieblichen Prozessen bzw. Verfahren sowie die Markteinführung dabei hergestellter Produkte erfolgen nur dann, wenn dies auch wirtschaftlich erfolgversprechend ist. Die wirtschaftliche Vertretbarkeit der für den endgültigen Einsatz von RC-Baustoffen aus Mauerwerk erforderlichen Maßnahmen wird im Generalziel Z4 berücksichtigt.

In Tab. 6.1 sind die Generalziele ihren Bewertungsschritten innerhalb des Bewertungskonzepts zugeordnet. Nur für die im Zuge der Wirksamkeitsanalyse untersuchten Generalziele Z1 und Z2 wird eine weitergehende Zieluntergliederung vorgenommen. Eine von der Materialqualität losgelöste Beurteilung der Generalziele Z1, Z2 und Z4 ist nicht möglich. Deshalb werden hier die zu Generalziel Z3 gehörenden Anforderungen an die Materialqualität als zu erfüllende Grundbedingung formuliert (Kap. 6.3). Das Generalziel Z4 wird im Rahmen der Kostenanalyse geprüft. Es bedarf keiner weiteren Zieluntergliederung. Für eine wirtschaftliche Gestaltung der Lebensendphase von Mauerwerk gilt lediglich, dass die erzielbaren Einnahmen die Ausgaben übersteigen.

Tab. 6.1: Generalziele für die Bewertung der Lebensendphase von Mauerwerk

Generalziel		Bewertungsschritt
Z1	Schutz von Mensch und Umwelt	Wirksamkeitsanalyse
Z2	Ressourcenschonung	Wirksamkeitsanalyse
Z3	Ausreichende Materialqualität	Prüfung der Grundbedingung
Z4	Wirtschaftlichkeit	Kostenanalyse

Die Generalziele Z1 und Z2 werden nun einer festen Hierarchie folgend in Oberziele, Ziele, Unterziele und messbare Zielkriterien untergliedert (Abb. 6.3). Die Unterziele verfolgen die Minimierung bzw. Maximierung der messbaren Zielkriterien (Kap. 6.5). Für die zukünftige Anwendung des entwickelten Bewertungskonzepts wird das Zielsystem hier nur bis zur Ebene der Oberziele inhaltlich starr vorgegeben. Die darunter liegenden Zielebenen sind flexibel gestaltbar und können spezifisch vom jeweiligen Nutzer festgelegt werden. Dies ermöglicht im Bedarfsfall eine projektbezogene Anpassung bzw. Erweiterung der unteren Zielebenen.

Innerhalb des festgelegten Zielsystems haben die hergeleiteten Generalziele Z1 und Z2 nicht die gleiche Bedeutung. So wird nach EU-Abfallrahmenrichtlinie [3] und Kreislaufwirtschaftsgesetz [104] gesundheits- und umweltbezogenen Gesichtspunkten die oberste Priorität eingeräumt. Hiernach hat diejenige Maßnahme Vorrang, die den Schutz von Mensch und Umwelt am besten gewährleistet. Dabei sind die zu erwartenden Emissionen, das Maß der Schonung natürlicher Ressourcen, die einzusetzende oder zu gewinnende Energie sowie die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen aus Abfällen zu berücksichtigen. Die technische Machbarkeit und die wirtschaftliche Zumutbarkeit sind zusätzlich zu beachten. Um diesen unterschiedlichen Bedeutungen der Generalziele Z1 und Z2 einschließlich der unteren Zielebenen Rechnung zu tragen, ist eine entsprechende Gewichtung erforderlich. Diese kann prinzipiell von oben nach unten (Top-Down-Ansatz), d. h. von den Generalzielen in Richtung der Unterziele, oder von unten nach oben (Bottom-Up-Ansatz) erfolgen. Dabei beträgt die Summe der Gewichte einer Zielebene 100 Prozent. Die Summe der Gewichte von

Unterzielen, Zielen bzw. Oberzielen entspricht wiederum dem Gewicht des jeweils zugeordneten Ziels, Oberziels bzw. Generalziels auf der darüber liegenden Zielebene [188]. Da die unteren Zielebenen vom Nutzer inhaltlich flexibel festgelegt werden können, wird nur bis zur Ebene der Oberziele eine starre Vorgabe der Gewichtung (Abb. 6.3) vorgenommen. Der Nutzer kann somit für die unteren Zielebenen eine eigene Priorisierung vornehmen. Die nutzerspezifische Zielsetzung und -gewichtung muss beim Vergleich von Studien unterschiedlicher Verfasser berücksichtigt werden.

Die für die Beispielbetrachtungen der vorliegenden Arbeit festgelegte Zieluntergliederung für die Generalziele Z1 und Z2 einschließlich der Zielgewichtung, der Analyseinstrumente und der messbaren Zielkriterien ist in Tab. 6.2 und Tab. 6.3 zusammengefasst. Der Nutzer des Bewertungskonzepts erhält damit einen Vorschlag für eine mögliche Zieluntergliederung und -gewichtung über die Ebene der Oberziele hinaus. Die Festlegung des Zielsystems berücksichtigt die derzeit verfügbaren Daten und anerkannten Bewertungskriterien für die einzelnen Unterziele. Die hier gewählte Gewichtung greift die Zielpriorisierung gemäß EU-Abfallrahmenrichtlinie [3] und Kreislaufwirtschaftsgesetz [104] auf. Sie erfolgt mit dem Top-Down-Ansatz und orientiert sich dabei im Weiteren an Angaben aus [23], [32] und [73]. Die in [23] und [32] verwendeten Gewichtungsfaktoren stammen aus der Literatur und Befragungen entsprechender Interessengruppen (z. B. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Umweltbundesamt Österreich).

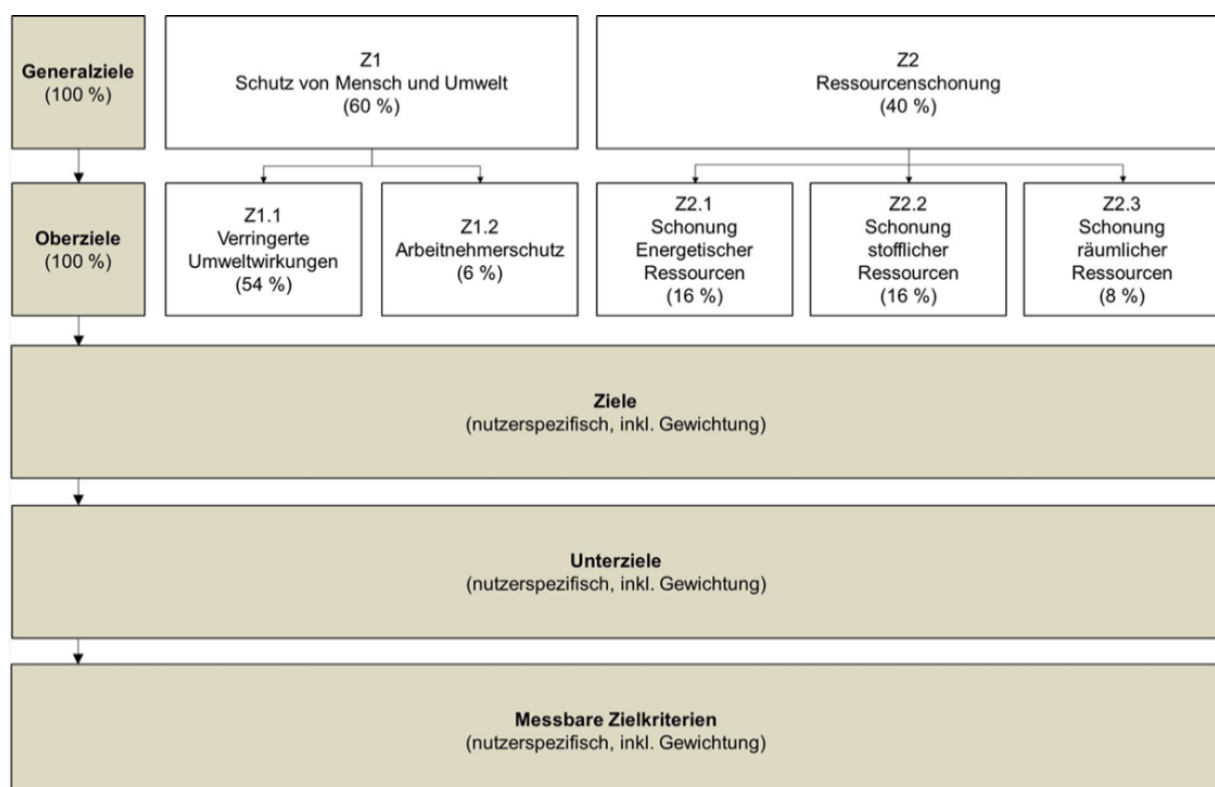


Abb. 6.3: Zielhierarchie zur Bewertung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk

Tab. 6.2: Zieluntergliederung und -gewichtung für Generalziel Z1

Generalziel Z1	60 %	Schutz von Mensch und Umwelt	
Oberziel Z1.1	54 %	Verringerte Umweltwirkungen	Analyseinstrument: Emissionsbilanz (Ökobilanz)
Ziel Z1.1.1	17 %	Reduzierung des Treibhauseffekts	
Unterziel Z1.1.1.1	3 %	Min. von Treibhausgasen verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	
Unterziel Z1.1.1.2	3 %	Max. der Einsparung von Treibhausgasen durch Einsatz von RC-Baustoffen	
Unterziel Z1.1.1.3	3 %	Max. der Einsparung von Treibhausgasen durch Verwertung von Fremdstoffen	
Unterziel Z1.1.1.4	8 %	Max. des Differenzwertes eingesparter und verursachter Mengen an Treibhausgasen	
Messbares Zielkriterium		$GWP_{Z1.1.1.n}$, Globales Erwärmungspotenzial	Einheit: kg CO ₂ -Äquivalent
Ziel Z1.1.2	7 %	Reduzierung der Versauerung von Boden und Gewässern	
Unterziel Z1.1.2.1	1 %	Min. saurer Emissionen verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	
Unterziel Z1.1.2.2	1 %	Max. der Einsparung saurer Emissionen durch Einsatz von RC-Baustoffen	
Unterziel Z1.1.2.3	1 %	Max. der Einsparung saurer Emissionen durch Verwertung von Fremdstoffen	
Unterziel Z1.1.1.4	4 %	Max. des Differenzwertes eingesparter und verursachter Mengen an sauren Emissionen	
Messbares Zielkriterium		$AP_{Z1.1.2.n}$, Versauerungspotenzial	Einheit: kg SO ₂ -Äquivalent
Ziel Z1.1.3	7 %	Reduzierung des Ozonabbaus	
Unterziel Z1.1.3.1	1 %	Min. von ozonzerstörenden Gasen verursacht durch Abbruch, Aufbereitung, Transport	
Unterziel Z1.1.3.2	1 %	Max. der Einsparung von ozonzerstörenden Gasen durch Einsatz von RC-Baustoffen	
Unterziel Z1.1.3.3	1 %	Max. der Einsparung von ozonzerstörenden Gasen durch Verwertung von Fremdstoffen	
Unterziel Z1.1.1.4	4 %	Max. des Differenzwertes eingesparter u. verursachter Mengen ozonzerstörender Gase	
Messbares Zielkriterium		$ODP_{Z1.1.3.n}$, Ozonabbaupotenzial	Einheit: kg CCl ₃ F-Äquivalent
Ziel Z1.1.4	16 %	Reduzierung der Gewässerüberdüngung	
Unterziel Z1.1.4.1	3 %	Min. eutrophierender Substanzen verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	
Unterziel Z1.1.4.2	3 %	Max. der Einsparung eutrophierender Substanzen durch Einsatz von RC-Baustoffen	
Unterziel Z1.1.4.3	3 %	Max. der Einsparung eutrophierender Substanzen durch Verwertung von Fremdstoffen	
Unterziel Z1.1.4.4	7 %	Max. des Differenzwertes eingesparter und verursachter Mengen eutroph. Substanzen	
Messbares Zielkriterium		$NP_{Z1.1.4.n}$, Eutrophierungspotenzial	Einheit: kg PO ₄ ³⁻ -Äquivalent
Ziel Z1.1.5	7 %	Reduzierung von Sommersmog	
Unterziel Z1.1.5.1	1 %	Min. von bodennah ozonbildenden Gasen bei Abbruch, Aufbereitung und Transport	
Unterziel Z1.1.5.2	1 %	Max. der Einsparung bodennah ozonbildender Gase durch Einsatz von RC-Baustoffen	
Unterziel Z1.1.5.3	1 %	Max. der Einsparung bodennah ozonbildender Gase durch Verwertung von Fremdstoffen	
Unterziel Z1.1.5.4	4 %	Max. des Differenzwertes. eingesparter u. verursachter Mengen bodennah ozonbildender Gase	
Messbares Zielkriterium		$POCP_{Z1.1.5.n}$, Sommersmogpotenzial	Einheit: kg C ₂ H ₄ -Äquivalent
Oberziel Z1.2	6 %	Arbeitnehmerschutz	Analyseinstrument: LCWE
Ziel Z1.2.1	6 %	Unfallvermeidung	
Unterziel Z1.2.1.1	6 %	Min. der Anzahl schwerer und tödlicher Unfälle	
Messbares Zielkriterium		$U_{Z1.2.1.n}$, Anzahl schwerer und tödlicher Unfälle	Einheit: keine

Abkürzungen: Max. - Maximierung, Min. - Minimierung

Tab. 6.3: Zieluntergliederung und -gewichtung für Generalziel Z2

Generalziel Z2	40 %	Ressourcenschonung	
Oberziel 2.1	16 %	Schonung energetischer Ressourcen	Analyseinstrument: Energiebilanz (Ökobilanz)
Ziel 2.1.1	16 %	Reduzierung des Energiebedarfs	
Unterziel Z2.1.1.1	2 %	Min. des Energieverbrauchs bei Abbruch, Aufbereitung und Transport	
Unterziel Z2.1.1.2	2 %	Max. der Energieeinsparung in der Primärrohstoffproduktion durch Einsatz von RC-Baustoffen	
Unterziel Z2.1.1.3	2 %	Max. der Energieeinsparung in der Primärrohstoffproduktion durch stoffliche Verwertung von Fremdstoffen	
Unterziel Z2.1.1.4	2 %	Max. der Energiegewinnung durch thermische Verwertung von Fremdstoffen, wie Kunststoffen	
Unterziel Z2.1.1.5	8 %	Max. des Differenzwertes zwischen eingesparten/gewonnenen und verbrauchten Energiemengen	
Messbares Zielkriterium		$PEI_{Z2.1.1.n}$, Primärenergiebedarf	Einheit: MJ
Oberziel Z2.2	16 %	Schonung stofflicher Ressourcen	Analyseinstrument: Materialbilanz (SFA)
Ziel Z2.2.1	16 %	Reduzierung des Bedarfs stofflicher Ressourcen	
Unterziel Z2.2.1.1	4 %	Max. des Einsatzes von RC-Baustoffen	
Unterziel Z2.2.1.2	4 %	Max. der stofflichen Verwertung von Fremdstoffen	
Unterziel Z2.2.1.3	8 %	Max. der Einsparung stoffl. Ressourcen durch RC-Baustoffe und stoffliche Verwertung von Fremdstoffen	
Messbares Zielkriterium		$M_{Z2.2.1.n}$, Materialmenge	Einheit: kg
Oberziel Z2.3	8 %	Schonung räumlicher Ressourcen	Analyseinstrument: Materialbilanz (SFA)
Ziel Z2.3.1	8 %	Reduzierung des Bedarfs an Deponievolumen	
Unterziel Z2.3.1.1	8 %	Min. der zu entsorgenden Materialmengen	
Messbares Zielkriterium		$M_{Z2.3.1.n}$, zu entsorgende Materialmenge	Einheit: kg

Abkürzungen: Max. - Maximierung, Min. - Minimierung

6.3 Definition von Grundbedingungen

Nach Festlegung des Zielsystems werden Grundbedingungen ermittelt. Diese Grundbedingungen sind Beschränkungen (z. B. Grenzwerte) und/oder Zielvorgaben (Sollwerte) ohne deren Erfüllung die im Zielsystem gesetzten Ziele nicht erreicht werden können. Die zu untersuchenden Szenarien für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk müssen auf ihre Kompatibilität mit den Grundbedingungen überprüft werden. Wird mindestens eine Grundbedingung von einem Szenario nicht eingehalten, muss das betreffende Szenario von der abschließenden Auswertung ausgeschlossen werden. Über Grenzwerte und Sollwerte hinaus, können weitere Bedingungen für die Szenarien formuliert werden. So können bestimmte Abbruch- und Aufbereitungstechniken, aber auch einzelne Anwendungsbereiche für RC-Baustoffe und Verwertungsmöglichkeiten für Fremdstoffe ausgeschlossen oder explizit gefordert werden. Nachfolgend werden Grundbedingungen für die Bewertung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk definiert bzw. beschrieben.

Die Materialqualität steht im Mittelpunkt von Generalziel Z3. Als wesentliche Einflussgröße bestimmt sie letztlich das Anwendungsgebiet der aus Abbruchmaterialien hergestellten RC-Baustoffe. Die Qualität der Abbruchmaterialien variiert in Abhängigkeit der vormalig verwendeten Mauerwerkbaustoffe mit ihren spezifischen Eigenschaften und der Art der Abbruch- und Aufbereitungsprozesse. Die Anforderungen an die Materialqualität umfassen die in Tab. 6.4 und Tab. 6.5 zusammengestellten anwendungsübergreifenden und anwendungsspezifischen Parameter.

Tab. 6.4: Anwendungsübergreifende Anforderungsparameter an die Materialqualität

Anwendungsübergreifende Anforderungsparameter
Umweltverträglichkeit
Stoffliche Zusammensetzung
Korngrößenverteilung
Kornrohddichte
Anteil und Qualität der Feinanteile

Tab. 6.5: Auswahl anwendungsspezifischer Anforderungsparameter an die Materialqualität

Anwendungsbereich	Anforderungsparameter
Gesteinskörnungen für Mauersteine	Kornformverteilung
	Huminstoffgehalt
	Schüttdichte und Packungsdichte
	Reindichte der Körnungen
	chemisch-mineralogische Beschaffenheit
Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Putz	Wasseraufnahme
	Salzgehalt (Chloride und Sulfate)
	Raumbeständigkeit
	Frostwiderstand
Gesteinskörnungen für den Straßenbau	Schüttdichte
	Kornform
	Frostwiderstand
	Widerstand gegen Zertrümmerung
	Salzgehalt (Chloride und Sulfate)
Gesteinskörnungen für den Erdbau	Verdichtungsverhalten (Proctordichte)
Gesteinskörnungen für die Vegetationstechnik	Wasserspeicherkapazität
	pH-Wert
	Salzgehalt
	Organische Substanz

Zum Zeitpunkt der Planung von Abbruchprojekten im Mauerwerksbau, d. h. noch vor dem Abbruch, ist eine Vorhersage der Materialeigenschaften des Abbruchmaterials und des daraus hergestellten Recyclingbaustoffs nur bedingt möglich. Eine abschließende Qualitätssicherung des Recyclingbaustoffs kann erst anhand des tatsächlich angefallenen Abbruchmaterials erfolgen. Im Rahmen von Eignungsprüfungen werden die jeweiligen Anforderungsparameter

parameter des vorgesehenen Anwendungsbereichs untersucht und abschließend bewertet. Während der Abbruchplanung kann jedoch mit einer Bestandsaufnahme durch Begehung des Abbruchobjektes, Auswertung von Unterlagen und Schadstofferkundung bereits ein Überblick zu den verwendeten Baustoffen gegeben werden [138]. Dies ermöglicht eine Abschätzung der stofflichen Zusammensetzung des Abbruchmaterials. Dazugehörige Grenzwerte bestimmen letztlich über die Einsatzfähigkeit in den jeweiligen Anwendungsbereichen oder eine Entsorgung des Abbruchmaterials. Darauf aufbauend wird hier die verpflichtende **Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“** eingeführt. Das Einhalten dieser stoffgruppenorientierten Grundbedingung wird mittels der Stoffflussanalyse überprüft. Die dazu benötigten Stoffgruppen sind in Tab. 6.6 definiert. Dazugehörige Grenzwerte enthält Tab. 6.7. Der Abgleich mit den Grenzwerten ermöglicht, vorbehaltlich nachgeordneter Eignungsprüfungen, die Auswahl eines Anwendungsbereiches für den aus Mauerwerkbruch hergestellten RC-Baustoffs.

Tab. 6.6: Definierte Stoffgruppen für die Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“

gemäß DIN 4226-100	Definierte Stoffgruppen			gemäß TP Gestein-StB	
	Bezeichnung		Kürzel		
Beton und Gesteinskörnungen nach DIN 4226-1	Beton und Gesteinskörnung		BT+GK	Beton und andere hydraulisch gebundene Baustoffe	
Klinker, nicht porosierter Ziegel				Mauerziegel	MZ
Kalksandstein	Kalksandstein		KS	Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe	
Andere mineralische Bestandteile: z.B. porosierter Ziegel, Leichtbeton, Porenbeton, haufwerksporiger Beton, Putz, Mörtel, poröse Schlacken, Bimsstein	Putz und Mörtel		PM		
	Porenbeton		PB	Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe, wie Poren- und Bimsbeton	
	Leichtbeton		LB		
Fremdbestandteile, z. B. Glas, Keramik, NE-Metallschlacke, Stuckgips, Gummi, Kunststoff, Metall, Holz, Pflanzenreste, Papier, sonstige Stoffe	Fremd- und Störstoffe			FS _{ges}	Fremdstoffe, wie Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien
	anorganisch	mineralisch	gipshaltige Baustoffe	GI	
			Keramik, Fliesen	KF	
			mineralische Dämmstoffe	MD	
			Glas	GL	
		metallisch	Nicht-Eisen-Metalle	NE	
			Eisen-Metalle	FE	
	organisch	Holz	HZ		
		Papier/Pappe	PP		
		Kunststoffe	KU		
		Gummi	GU		
		bitumenhaltige Baustoffe	BI		
		organische Dämmstoffe	OD		
		Boden	BO		
		Pflanzenreste	PF		
	weiteres	Textilien	TX		
		asbesthaltige Baustoffe	AB		
		teerhaltige Baustoffe	TB		
		sonstige Stoffe	XY		
Asphalt	teerfreier Asphalt		AS	Ausbauasphalt	

Tab. 6.7: Grenzwerte für die Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“

Definierte Anwendungsbereiche	Stoffgruppen (maximale und minimale Massenanteile in Prozent)										Quellen	
	Beton und Gesteinskörnungen	Klinker und Mauerziegel	Kalksandsteine	Putze und Mörtel	Porenbeton	Leichtbeton	Asphalt, teerfrei	Fremd- und Störstoffe				
								Kunststoffe	Weiteres (z. B. Glas, Metall, Papier, Gips)	Asbesthaltige Baustoffe		Teerhaltige Baustoffe
Verwertung von reinem Ziegelbruch (z. B. Tennenflächen im Sportplatzbau)	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Forschung und Praxis [9], [13], [48], [84], [89], [90], [107], [135], [143], [170], [171], [174], [175], [179], [205], [214], [218], [229], [230], [259]
Rohstoff zur Kalksandsteinherstellung	0	0	≥ 90	≤ 10	0	0	0	0	0	0	0	Forschung und Praxis [85], [91], [179]
Rohstoff zur Porenbetonherstellung	0	0	0	≤ 5	≥ 95	0	0	0	0	0	0	Forschung und Praxis [84], [167], [179], [180], [196]
Verwertung von reinem Porenbetonbruch (z. B. als Katzenstreu, Ölbinder)	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	Praxis und Forschung [5], [84], [87], [101], [110], [128], [167], [179], [180], [184], [192], [195], [196], [226], [245]
Rohstoff zur Herstellung von Leichtbeton	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	Forschung und Praxis [84]
Verwertung in der Vegetationstechnik (z. B. Pflanzsubstrate)		≥ 80			≥ 90		0	≤ 0,1	≤ 0,3	0	0	RAL-GZ 250 [194]
Rezyklierte Gesteinskörnung für Beton – Liefertyp 1 nach DIN 4226-100	≥ 90	≤ 10		≤ 2			≤ 1	≤ 0,2		0	0	DIN 4226-100 [55]
Rezyklierte Gesteinskörnung für Beton – Liefertyp 2 nach DIN 4226-100	≥ 70	≤ 30		≤ 3			≤ 1	≤ 0,5		0	0	
Rezyklierte Gesteinskörnung für Beton – Liefertyp 3 nach DIN 4226-100	≤ 20	≥ 80	≤ 5	≤ 5			≤ 1	≤ 0,5		0	0	
Rezyklierte Gesteinskörnung für Beton – Liefertyp 4 nach DIN 4226-100	≥ 80			≤ 20			≤ 1,0		0	0		
Straßenbau		≤ 30	≤ 5		≤ 1		≤ 30	≤ 0,2		0	0	TL Gestein-StB [234]
Erdbau								≤ 0,2		0	0	ZTV E-StB [260], TL BUB E-StB [233]
Sonstige Anwendungen (z. B. Mineralische Dämmschüttung)										0	0	Forschung und Praxis [84], [234], [260]

Die Einführung einer stoffgruppenorientierten Grundbedingung „Umweltverträglichkeit“ mit Anforderungen an den Grundwasser- und Bodenschutz ist nicht möglich. Denn ausreichend belastbare Vorhersagen zum Gehalt und zur Freisetzung umweltrelevanter Stoffe aus dem Abbruchmaterial können nicht getroffen werden. Einerseits ist die in der Literatur verfügbare Datenbasis zu umweltrelevanten Bestandteilen unterschiedlich zusammengesetzter Mauerwerkbrüche zu klein, so dass für den jeweiligen Einzelfall die Stoffgehalte experimentell ermittelt werden müssen. Andererseits hängt das Freisetzungsverhalten von Schadstoffen davon ab, in welcher chemischen Verbindung sie vorliegen und wie groß deren Löslichkeit ist. Das heißt, der Gesamtgehalt umweltrelevanter Bestandteile im Abbruchmaterial lässt sich nicht aus der stofflichen Zusammensetzung durch Summieren typischer Schadstoffgehalte einzelner Stoffgruppen ableiten. Stoffgruppenbezogene Untersuchungsergebnisse zu umweltrelevanten Bestandteilen liegen ohnehin nur in wenigen Studien, Schnöller et al. [215], Schäfer et al. [204] und Ketelhut [136], vor. Darin wurden außerdem bloß Einzelbestandteile für ausgewählte Stoffgruppen ermittelt, z. B. Blei, Chrom und Kupfer in Putzen.

Als Ersatz für eine Grundbedingung „Umweltverträglichkeit“ könnte der Nutzer des Bewertungskonzepts bei Generalziel Z1 „Schutz von Mensch und Umwelt“ auch ein Unterziel „Minimierung der Schadstoffkonzentration im Recyclingbaustoff“ bzw. „Maximierung der Fremd- und Störstoffentfrachtung“ aufnehmen. Dieses Unterziel könnte beispielsweise durch selektiven Abbruch von Sulfatträgern, wie Gipskartonplatten, oder durch Aussortierung von Fremdstoffen erfüllt werden. Eine leistungsfähige Fremd- und Störstoffentfrachtung ist zwar mit einer Qualitätsverbesserung des aufbereiteten Abbruchmaterials verbunden, gleichzeitig fallen jedoch auch mehr Mengen zu entsorgender Materialien an. Dies steht im Widerspruch zum hier definierten Unterziel Z2.3.1.1 „Minimierung der zu entsorgenden Materialmengen“. Aus diesem Grund wird hier auf die Einführung eines Unterziels zur Leistungsfähigkeit der Fremd- und Störstoffentfrachtung verzichtet.

Für einzelne messbare Zielkriterien kann als zusätzliche Grundbedingung ein **unterer bzw. oberer Sollwert** vom Nutzer des Bewertungskonzepts definiert werden. Dieser Sollwert entspricht einem mindestens zu erreichenden bzw. maximal zulässigen Wert eines Zielkriteriums, der durch bestimmte Abbruch- und Aufbereitungsmaßnahmen erzielt werden soll bzw. muss. So könnte auch eine Mindestquote zur Fremd- und Störstoffentfrachtung festgelegt werden. Eine weitere Auswahl unterer und oberer Sollwerte im Rahmen der Lebensendphase von Mauerwerk ist in Tab. 6.8 zusammengestellt. Insgesamt wird das Einhalten der Sollwerte bei der Wirksamkeits- bzw. der Kostenanalyse überprüft.

Tab. 6.8: Auswahl unterer und oberer Sollwerte für verschiedene Zielkriterien

Untere Sollwerte	Kompatibilitätsprüfung im Rahmen der
Einsparquoten für Energieverbrauch	Wirksamkeitsanalyse
Einsparquoten für Emissionen	Wirksamkeitsanalyse
Verwertungsquote für RC-Baustoffe	Wirksamkeitsanalyse
Verwertungsquote für Fremdstoffe	Wirksamkeitsanalyse
Obere Sollwerte	Kompatibilitätsprüfung im Rahmen der
verfügbares Budget	Kostenanalyse
Obergrenze für Energieverbrauch	Wirksamkeitsanalyse
Obergrenze für Emissionen	Wirksamkeitsanalyse
Obergrenze für Unfallzahlen	Wirksamkeitsanalyse

6.4 Stoffflussanalyse für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk und Modellierung

Die einzelfallbezogene Bewertung potenzieller Gestaltungsvarianten für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk erfordert eine umfassende Stoffflussanalyse (SFA, Kap. 4.3.3) verbunden mit einer projektbezogenen Datenrecherche. Die SFA ermöglicht die Darstellung von Bewertungsszenarien sowie die Quantifizierung der festgelegten Zielkriterien und der wirtschaftlichen Aufwendungen für die einzelnen Szenarien. Sie bildet somit die Grundlage für die Wirksamkeits- und die Kostenanalyse. Darüber hinaus wird mit Hilfe der SFA die Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“ geprüft. Die wichtigsten Festlegungen zur SFA im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit umfassen:

- die Systemgrenze mit Systeminput und Systemoutput,
- die funktionelle Einheit,
- die Stoffflüsse im Untersuchungssystem,
- die Prozesse im Untersuchungssystem,
- die Anwendungsbereiche für Mauerwerkbruch und Fremdstoffe,
- ökobilanzielle Gutschriften für Primärrohstoffe und Primärenergie,
- das SFA-Modell.

Die Bewertung des Untersuchungssystems „Abbruch und Aufbereitung von Mauerwerk“ erfolgt innerhalb einer definierten **Systemgrenze**. Die Systemgrenze gilt gleichermaßen für die Ökobilanzierung, Wirksamkeitsanalyse und die Kostenanalyse. Die hier gewählte Systemgrenze (inklusive Systeminput und -output) ist in Abb. 6.4 dargestellt. Sie umschließt die Prozesse der zwei Subsysteme „Abbruch“ und „Aufbereitung“ sowie notwendige Transportprozesse und Stoffflüsse. Das Subsystem „Anwendung“ fließt über die Vergabe ökobilanzziel-

ler Gutschriften ein. Die Gutschriftenvergabe erfolgt für eingesparte Primärrohstoffe in den einzelnen Anwendungsbereichen durch den Einsatz von RC-Baustoffen und durch die stoffliche Verwertung von Fremdstoffen sowie für eingesparte oder neu gewonnene Primärenergie durch die thermische Verwertung von Fremdstoffen.

Unberücksichtigt bleiben:

- die Herstellung der Mauersteine und des Mauerwerks,
- über das Subsystem „Aufbereitung“ hinausgehende Bearbeitungsschritte des Recyclingmaterials aus Mauerwerkbruch (z. B. thermische Prozesse bei der Herstellung von leichten Gesteinskörnungen für Beton nach Müller et al. [177]),
- die Endprodukte in den jeweiligen Anwendungsbereichen, wie ein Kubikmeter Beton oder ein Kilometer Straße, und die damit verbundenen ökologischen, ökonomischen und technischen Aufwendungen,
- die mit der Entsorgung verbundenen ökologischen, ökonomischen und technischen Aufwendungen,
- die Montage von Maschinen und Anlagenkomponenten für Abbruch-, Aufbereitungs- und Transportprozesse sowie Maßnahmen für Reparatur und Instandhaltung,
- An- und Abtransport der mobilen Aufbereitungsanlage,
- genehmigungs- und zulassungsrechtliche Aspekte für Abbrucharbeiten und das Betreiben von Aufbereitungsanlagen und Entsorgungseinrichtungen.

Als **funktionelle Einheit**, d. h. als Bezugsgröße für alle Berechnungen und Auswertungen, wurde eine Tonne abgebrochenes Mauerwerk gewählt.

Folgende **Stoffflüsse** liegen für das definierte Untersuchungssystem vor:

- die für die Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“ festgelegten Stoffgruppen gemäß Tab. 6.6,
- Strom unterschiedlicher Herkunft (z. B. Braunkohle, Erdgas, Wasserkraft) als Energieträger zum Betreiben stationärer Anlagenkomponenten, wie Windsichter, Setzmaschine,
- Diesel als Energieträger zum Betreiben mobiler Maschinen und Anlagenkomponenten, wie mobile Brecher, aber auch LKW, Bagger und Radlader.

Wasser und Betriebsstoffe (z. B. Schmieröl) zum Betreiben der Maschinen und Anlagenkomponenten werden aufgrund unzureichend belastbarer Daten nicht berücksichtigt.

Für die Stoffflüsse gelten folgende Annahmen:

- aufbereiteter Mauerwerkbruch wird in Abhängigkeit von der Qualität (Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“) einem Anwendungsbereich zugeführt,
- aussortierte Fremdstoffe wie Holz, Papier/Pappe und Kunststoff werden einer thermischen Verwertung zugeführt,
- aussortierte FE-Metalle werden einer stofflichen Verwertung zugeführt, d. h. recycelt,
- während der Aufbereitung separat anfallendes Ziegelmateriale wird einer entsprechenden Anwendung zugeführt,
- Vorsiebmaterial wird entsorgt.

Als Abbruchprozesse für Mauerwerk können die in Kap. 3.2 beschriebenen Verfahren herangezogen werden. Als Aufbereitungsprozesse für Mauerwerkbruch können wiederum die in Kap. 3.3 beschriebenen Verfahren eingesetzt werden. Die je nach Szenariozusammenstellung innerhalb des Untersuchungssystems anfallenden Transportprozesse sind in Tab. 6.9 getrennt nach Transporteinheit zusammengestellt. Die Transportentfernungen für Radlader und LKW werden bei der Zusammenstellung der Szenarien projektabhängig und nutzerspezifisch festgelegt. Einsetzbare Anlagenkomponenten, Maschinen und Werkzeuge zur Ausführung der Abbruch-, Aufbereitungs- und Transportprozesse sind mit möglichen Leistungskennwerten in Anhang 11.2.3 tabellarisch aufgeführt. Zu den Leistungskennwerten gehören:

- Abbruchleistung der Abbruchmaschinen und -werkzeuge in $[m^3/h]$ bzw. $[t/h]$
- Dieserverbrauch der Abbruchmaschinen und -werkzeuge in $[l/h]$
- dimensionierter Durchsatz der stationären/mobilen Aufbereitungsanlage in $[t/h]$
- Auslastung der stationären/mobilen Aufbereitungsanlage in $[\%]$
- Nennleistung mobiler/stationärer Aufbereitungsaggregate in $[kW]$
- Dieserverbrauch mobiler Aufbereitungsaggregate bei Nennleistung in $[l/h]$
- Ladeleistung der Radlader in $[t/h]$
- Ladekapazität der LKW in $[t]$
- Dieserverbrauch der Radlader und LKW in $[l/km]$
- Nennleistung der Förderbänder der stationären Aufbereitungsanlage in $[kW]$

Die in Tab. 11.3, Tab. 11.4 und Tab. 11.5 zusammengestellten Angaben dienen als Grundlage für die Beispielberechnungen und gleichermaßen als Anhaltswerte für den Konzeptnutzer bei der Szenariozusammenstellung. Diese Werte können davon abweichend nutzerspezifisch und projektabhängig festgelegt werden. Dabei kann vom Nutzer zur Datenrecherche vornehmlich auf Firmenprospekte und Datenblätter von Herstellern entsprechender Anlagen, Maschinen und Werkzeuge zurückgegriffen werden.

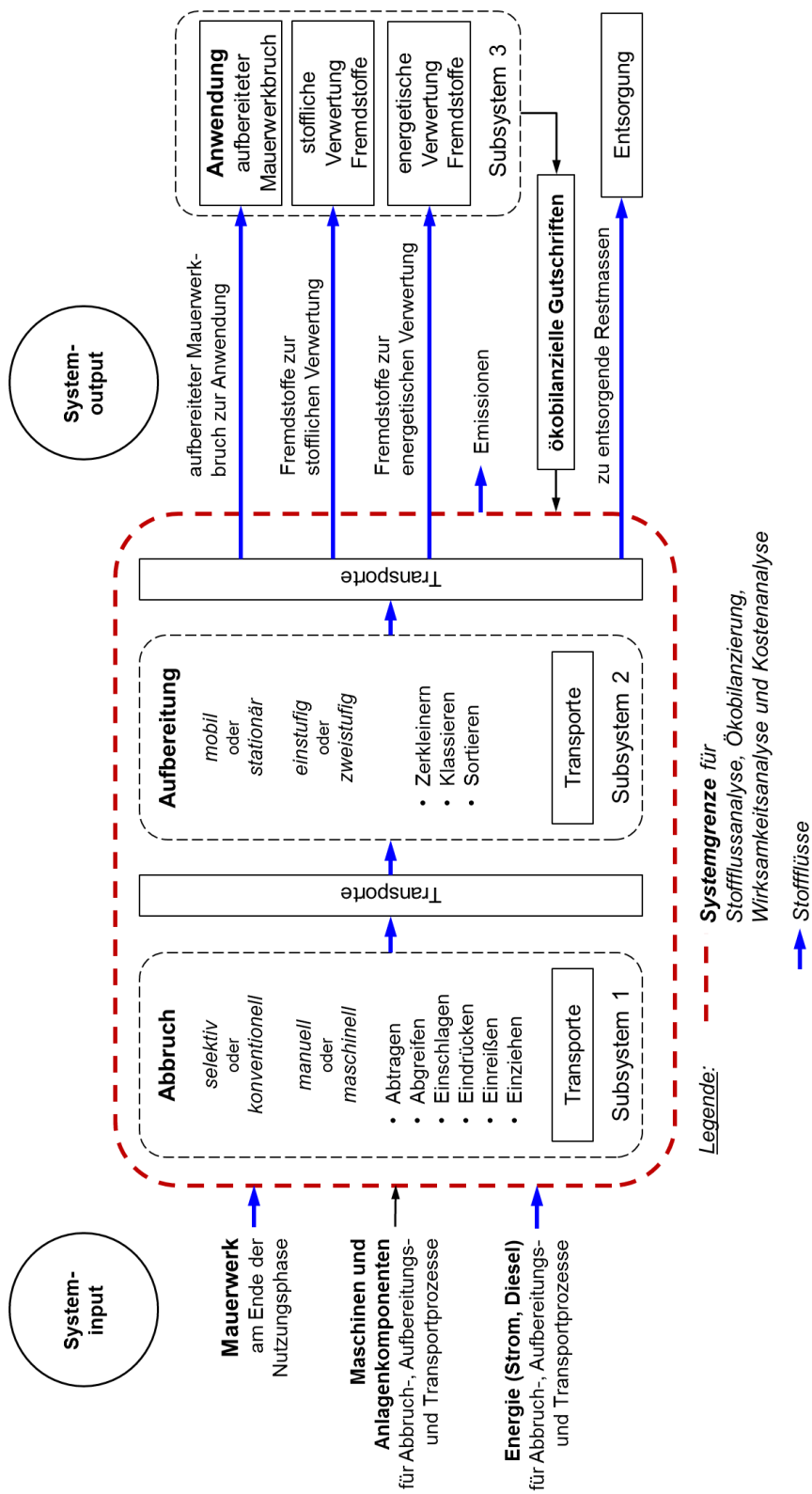


Abb. 6.4: Betrachtetes Untersuchungssystem „Abbruch und Aufbereitung von Mauerwerk“

Beim Durchlaufen der Abbruch- und Aufbereitungsprozesse, insbesondere bei der Sortierung, werden die einzelnen Stoffflüsse aufgespalten. Der Grad dieser Aufspaltung wird durch den Transferkoeffizienten beschrieben, der für alle Prozesse definiert ist. In Tab. 11.6 sind Transferkoeffizienten für einzelne Abbruch- und Aufbereitungsprozesse als mögliche Wertebereiche von Sortiertiefen zusammengestellt.

Die Anwendungsbereiche für RC-Baustoffe aus Mauerwerkbruch ergeben sich durch Prüfung der Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“. Es können insgesamt nur solche Anwendungsmöglichkeiten berücksichtigt werden, die vom aktuellen Regelwerk erfasst werden. In Tab. 6.10 erfolgt die Zuordnung der einzelnen Anwendungsmöglichkeiten aus Tab. 3.16 zu den definierten Anwendungsbereichen nach Tab. 6.7.

Mit der Anwendung von aufbereitetem Mauerwerkbruch und der Verwertung aussortierter Fremdstoffe sollen insgesamt Primärrohstoffe eingespart und zusätzlich Umweltwirkungen verringert werden. Zur Einbindung des Subsystems „Anwendung“ in die Bewertung werden **ökobilanzielle Gutschriften** für ersetzte Primärrohstoffe vergeben. Dazu gehören Gutschriften für natürliche Gesteinskörnungen (Feinsand, Sand, Kies) und leichte Gesteinskörnungen (Bims, Blähton, Lava), aber auch Zement und Stahl. Darüber hinaus können Gutschriften für die eingesparte Primärenergiegewinnung für Strom und Wärme verteilt werden. Die Gutschriften erfolgen in Form eingesparter Umweltwirkungen, wie dem Treibhauspotenzial. Bei der thermischen Verwertung von Fremdstoffen in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) entstehen jedoch zusätzliche Emissionen, die bei der Betrachtung der Umweltwirkungen für das Untersuchungssystem „Abbruch und Aufbereitung von Mauerwerkbruch“ berücksichtigt werden müssen.

Aus den beschriebenen Stoffflüssen, Prozessen und Gutschriften werden für eine Szenarioanalyse unterschiedliche **SFA-Modelle** als Bewertungsszenarien zusammengesetzt. Die Szenarioanalyse ermöglicht es, verschiedene Varianten bezüglich der Ausgestaltung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk zu untersuchen und zu bewerten. Die zusammengestellten Szenarien müssen dabei kompatibel mit den definierten Grundbedingungen sein. Beispiele für SFA-Modelle werden in Kap. 7 gegeben.

Tab. 6.9: Transportprozesse im Untersuchungssystem getrennt nach Transporteinheit

Transporteinheit	Transportprozess
Radlader	Transport des aufzubereitenden Mauerwerkbruchs auf der Abbruchstelle zur mobilen Aufbereitungsanlage (inkl. Beschickung)
	Verladen des aufzubereitenden Mauerwerkbruchs auf der Abbruchstelle auf einen LKW zum Weitertransport zur stationären Aufbereitungsanlage
	Beschicken der stationären Aufbereitungsanlage
	Verladen zu entsorgender Restmassen auf der Abbruchstelle oder der stationären Aufbereitungsanlage auf einen LKW zum Weitertransport zur Entsorgungsstelle
	Verladen aussortierter Fremdstoffe zur energetischen Verwertung auf der Abbruchstelle oder der stationären Aufbereitungsanlage auf einen LKW zum Weitertransport zur Verbrennungsanlage
	Verladen aussortierter Fremdstoffe zur stofflichen Verwertung auf der Abbruchstelle oder der stationären Aufbereitungsanlage auf einen LKW zum Weitertransport zur Recyclinganlage
	Verladen des aufbereiteten Mauerwerkbruchs auf der Abbruchstelle oder der stationären Aufbereitungsanlage auf einen LKW zum Weitertransport zum Ort der Anwendung
LKW	Transport des Mauerwerkbruchs von der Abbruchstelle zur stationären Aufbereitungsanlage
	Transport zu entsorgender Restmassen von der Abbruchstelle oder der stationären Aufbereitungsanlage zur Entsorgungsstelle
	Transport aussortierter Fremdstoffe zur energetischen Verwertung von der Abbruchstelle oder der stationären Aufbereitungsanlage zur Verbrennungsanlage
	Transport aussortierter Fremdstoffe zur stofflichen Verwertung von der Abbruchstelle oder der stationären Aufbereitungsanlage zur Recyclinganlage
	Transport des aufbereiteten Mauerwerkbruchs von der Abbruchstelle oder der stationären Aufbereitungsanlage zum Ort der Anwendung
Förderbänder	Materialtransport zwischen einzelnen Anlagenkomponenten der stationären Aufbereitungsanlage

Tab. 6.10: Zuordnung von Anwendungsmöglichkeiten zu definierten Anwendungsbereichen

Definierte Anwendungsbereiche	Anwendungsmöglichkeiten
Verwertung von reinem Ziegelbruch	<ul style="list-style-type: none"> • Magerungsmittel bzw. Füllstoff bei der Mauerziegel-Herstellung • Mauerstein-Herstellung • Recycling-Mauerstein • Gesteinskörnung für Formkörper • Gesteinskörnung für Beläge mit Oberflächenschliff • Zierkies > 8 mm • Schotterrasen • farbgebender Zusatz für Putzmörtel (Gelb-, Rot-, und Brauntöne) • Zementzumahlstoff/Betonzusatz • Tennenbelag (Sportplatzbau) • Wiederverwertung von Abbruch-Ziegeln als hochwertiger Bodenbelag
Rohstoff zur Kalksandsteinherstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Recycling-Mauerstein • Kalksandstein-Herstellung
Rohstoff zur Porenbetonherstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Porenbetonstein-Herstellung
Verwertung von reinem Porenbetonbruch	<ul style="list-style-type: none"> • Hygieniestreu, Öl- und Flüssigkeitsbinder • Deponiebaustoff • Granulat zur Abwasserreinigung • Granulat zur Rauchgasreinigung • Gesteinskörnung für Leichtbaustoffe (Leichtmörtel, -beton, Dämmputz) • Gesteinskörnung für Leichtmörtelsteine • Düngemittelzusatz (Sulfatträger, Nährstoffträger), Bodenverbesserung
Rohstoff zur Herstellung von Leichtbeton	<ul style="list-style-type: none"> • Leichtbetonstein-Herstellung
Verwertung in der Vegetationstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Pflanzsubstrate (Dachbegrünung) • Drainschichten (Dachbegrünung) • Vegetationsschicht (Dachbegrünung) • Baumsubstrate
Rezyklierte Gesteinskörnung für Beton – Liefertyp 1 nach DIN 4226-100	<ul style="list-style-type: none"> • rezyklierte Gesteinskörnung für Beton • rezyklierte Gesteinskörnung für Mörtel (Putz)
Rezyklierte Gesteinskörnung für Beton – Liefertyp 2 nach DIN 4226-100	<ul style="list-style-type: none"> • rezyklierte Gesteinskörnung für Beton bis C 25/30 • rezyklierte Gesteinskörnung für Mörtel (Putz)
Rezyklierte Gesteinskörnung für Beton – Liefertyp 3 nach DIN 4226-100	<ul style="list-style-type: none"> • rezyklierte Gesteinskörnung für Betonwaren und -elemente, • rezyklierte Gesteinskörnung für Mörtel (Putz)
Rezyklierte Gesteinskörnung für Beton – Liefertyp 4 nach DIN 4226-100	<ul style="list-style-type: none"> • rezyklierte Gesteinskörnung für Beton bis C 8/10, unbewehrt, nicht tragende Bauteile • rezyklierte Gesteinskörnung für Mörtel (Putz)
Straßenbau	<ul style="list-style-type: none"> • Tragschichten ohne Bindemittel • Bettungsmaterial für Pflasterarbeiten (Pflastersand) • Tragschichten im Sportplatzbau
Erdbau	<ul style="list-style-type: none"> • Damm- und Verfüllbaustoff für Erdbaumaßnahmen • Drainagematerial
Sonstige Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> • Mineralische Dämmschüttungen (Trittschall, Wärme)

6.5 Wirksamkeitsanalyse

Nach Quantifizierung der messbaren Zielkriterien mit Hilfe der Stoffflussanalyse und der Ökobilanzierung wird die Wirksamkeitsanalyse durchgeführt. Die Wirksamkeitsanalyse umfasst dabei folgende Arbeitsschritte:

- Bestimmung der einzelnen Zielerreichungsgrade der verschiedenen Unterziele pro Szenario als Teilwirksamkeiten über die Betrachtung der minimal und maximal beobachteten Ausprägungen eines Zielkriteriums,
- Gewichtung der einzelnen Teilwirksamkeiten.
- Zusammenführung der einzelnen Teilwirksamkeiten zur Gesamtwirksamkeit nach Brunner et al. [23].

Die Überführung der ermittelten Zielkriterien in Teilwirksamkeitswerte erfolgt über die Betrachtung der minimal und maximal beobachteten Ausprägungen eines Zielkriteriums in den betrachteten Szenarien sowie der ihnen zugeordneten Wirksamkeiten. Die Teilwirksamkeit für jedes Unterziel in einem Szenario ergibt sich durch lineare Interpolation zwischen der minimal und der maximal beobachteten Ausprägung. Auf diesem Weg können für jedes Unterziel die Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien errechnet und vergleichend gegenübergestellt werden. Der Rechenansatz ist in Abb. 6.5 grafisch dargestellt. Insgesamt gilt folgende Interpolationsgleichung:

$$W_{z_i} = W_{z_{min}} + (W_{z_{max}} - W_{z_{min}}) \cdot \frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \quad (F.1)$$

mit W_{z_i} Teilwirksamkeit eines Unterziels im Szenario i
 $W_{z_{min}}$ Teilwirksamkeit der minimal beobachteten Ausprägung eines Zielkriteriums
 $W_{z_{max}}$ Teilwirksamkeit der maximal beobachteten Ausprägung eines Zielkriteriums
 z_i Ausprägung eines Zielkriteriums im Szenario i
 z_{min} minimal beobachtete Ausprägung eines Zielkriteriums in allen Szenarien
 z_{max} maximal beobachtete Ausprägung eines Zielkriteriums in allen Szenarien

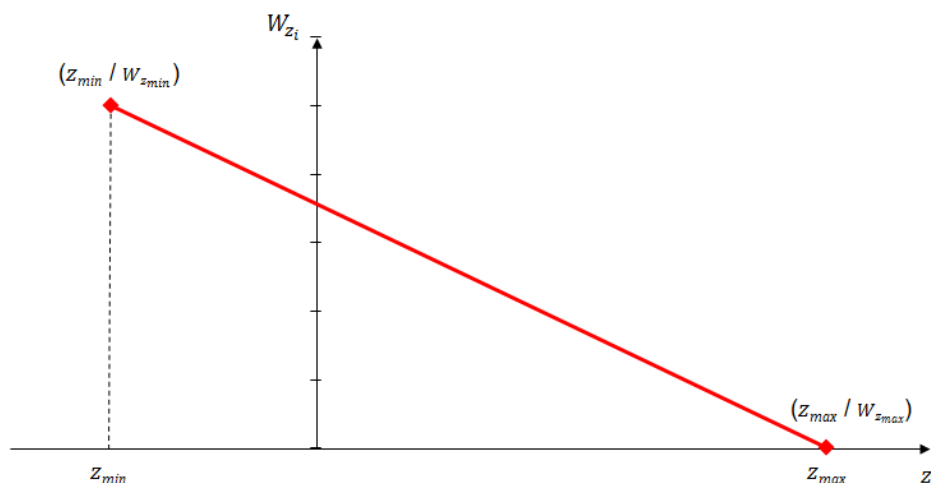


Abb. 6.5: Grafische Darstellung zur Überführung von Zielkriterien in Teilwirksamkeiten

Bei Minimierung eines Zielkriteriums entspricht der Minimalwert aller Ausprägungen einer Wirksamkeit von 1,0. Gleichzeitig beträgt die Wirksamkeit für den Maximalwert gleich 0,0. Analog dazu ist im Fall einer Maximierung die Wirksamkeit für den Maximalwert auf 1,0 und für den Minimalwert wiederum auf 0,0 gesetzt. Die zwischen Minimum und Maximum liegenden Szenarien besitzen Teilwirksamkeiten zwischen 0,0 und 1,0. Aus den beschriebenen Annahmen für Minimierung bzw. Maximierung eines Zielkriteriums ergeben sich für die Interpolation folgende Vereinfachungen:

bei Minimierung eines Zielkriteriums (z. B. bei Energieverbrauch), Abb. 6.6

$$W_{z_i} = 1 - \frac{z_i - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \quad \text{für } W_{z_{\min}} = 1,0 \text{ und } W_{z_{\max}} = 0,0 \quad (\text{F.2})$$

bei Maximierung eines Zielkriteriums (z. B. bei Energiegewinnung), Abb. 6.7

$$W_{z_i} = \frac{z_i - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \quad \text{für } W_{z_{\min}} = 0,0 \text{ und } W_{z_{\max}} = 1,0 \quad (\text{F.3})$$

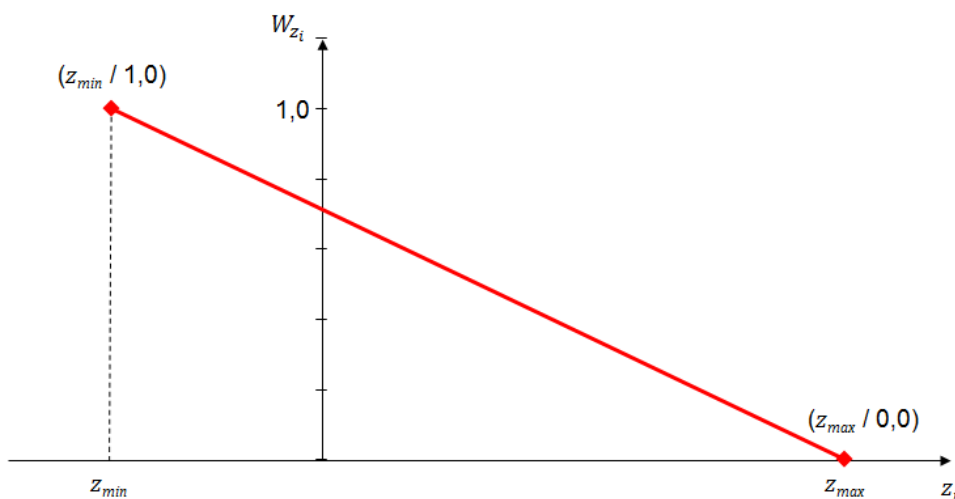


Abb. 6.6: Grafische Darstellung zur Minimierung eines Zielkriteriums

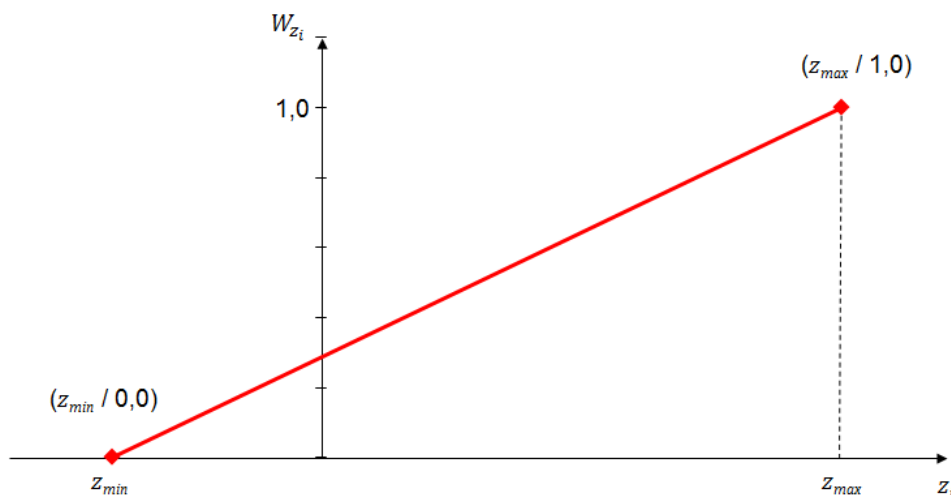


Abb. 6.7: Grafische Darstellung zur Maximierung eines Zielkriteriums

Nach Ermittlung der Teilwirksamkeiten für die verschiedenen Unterziele werden diese entsprechend ihrer Bedeutung einzeln gewichtet. Dies erfolgt durch Multiplikation mit dem dazugehörigen Zielgewicht (Tab. 6.2 und Tab. 6.3):

$$W_{zi}^* = \frac{G_z}{100} \cdot W_{zi} \quad (\text{F.4})$$

mit W_{zi}^* gewichtete Teilwirksamkeit eines Unterziels im Szenario i
 G_z Gewicht eines Unterziels in [%]

Nach Gewichtung der Teilwirksamkeiten folgt die Ermittlung der Gesamtwirksamkeit für jedes Szenario. Diese ergibt sich durch die Aufsummierung aller gewichteten Teilwirksamkeiten eines Szenarios:

$$GW_i = \sum W_{zi}^* \quad (\text{F.5})$$

mit GW_i Gesamtwirksamkeit des Szenarios i
 W_{zi}^* gewichtete Teilwirksamkeit eines Unterziels im Szenario i

6.6 Kostenanalyse

Mit dem Erreichen der Lebensendphase von Mauerwerk entstehen Kosten durch Abbruch, Aufbereitung und Anwendung sowie durch Entsorgung und Transporte. Die Quantifizierung dieser Kosten erfolgt im Rahmen der Kostenanalyse. Die Gesamtkosten eines Szenarios setzen sich aus Ausgaben und Einnahmen zusammen. Es gilt:

$$K_{ges,i} = \sum K_{aus,i} - \sum K_{ein,i} \quad (\text{F.6})$$

mit $K_{ges,i}$ Gesamtkosten des Szenarios i
 $\sum K_{aus,i}$ Summe der Ausgaben im Szenario i
 $\sum K_{ein,i}$ Summe der Einnahmen im Szenario i

Die wesentlichen Kostenfaktoren auf der Ausgabenseite sind Planungskosten, Personal- und Gerätekosten, Annahmekosten an der Bauschuttaufbereitungsanlage, Entsorgungskosten sowie Transportkosten. Zu den Einnahmen gehören Annahmeerlöse für Abbruchmaterialien sowie Verkaufserlöse für RC-Baustoffe und stofflich verwertbare Fremdstoffe, wie Eisen. Die Wirtschaftlichkeit des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk wird wesentlich von

der Qualität der aus Mauerwerkbruch herstellbaren RC-Baustoffe und der damit verbundenen Erlössituation beeinflusst. Die erzielbaren Qualitäten und Erlöse der RC-Baustoffe hängen wiederum vom Abbruchverfahren und der anschließend notwendigen Aufbereitung sowie den damit verbundenen Kosten ab.

Um den Abbruch eines Bauwerks effizient zu gestalten, ist eine detaillierte Abbruchplanung erforderlich. Dazu gehört die Begehung des Abbruchobjektes mit Erfassung der verbauten Materialien. In der Praxis stehen allerdings für eine detaillierte Planung oft nicht genügend Zeit und Informationen zur Verfügung [153]. Insgesamt kann sich die Planung jedoch positiv auf die Erlössituation der RC-Baustoffe auswirken, denn mit steigender Qualität der RC-Baustoffe erhöht sich auch der erzielbare Erlös. Unter Umständen können gleichzeitig auch die Entsorgungskosten gesenkt werden. Je gezielter und tiefgehender der Abbruch durchgeführt wird, desto höher sind zwar die Kosten für Planung und Ausführung, aber desto sortenreiner liegen die Abbruchmaterialien vor. Mit Erhöhung der Sortenreinheit des Abbruchmaterials verringert sich zugleich der erforderliche Aufwand für Sortierung und Fremdstoffentfrachtung bei der Aufbereitung [126]. Je komplexer die stationäre Anlage ausgelegt ist, desto teurer wird die Aufbereitung. Allerdings können dadurch bessere Materialqualitäten erzielt werden.

Die Entsorgungskosten wirken in der Regel den Abbruch- und Aufbereitungskosten entgegen. Sie umfassen die Annahmegebühren auf Deponien und Müllverbrennungsanlagen. Durch selektiven Abbruch und gute Aufbereitung der Abbruchmassen können durch die Erhöhung der Recyclingmengen die Entsorgungskosten gesenkt werden. Durch die Abtrennung von Fremdstoffen aus dem Abbruchmaterial entstehen auch Fraktionen mit erhöhten Schadstoffkonzentrationen, die teuer deponiert werden müssen. Es ist dadurch also möglich, dass sich die Verkaufserlöse für RC-Baustoffe und die Entsorgungskosten gleichzeitig erhöhen [35].

Bei den Abbruchmassen handelt es sich überwiegend um Materialien von hoher Masse, die in großen Mengen anfallen. Daher kommt den Transportkosten innerhalb der Kostenanalyse eine relativ große Bedeutung zu. Diese Kosten umfassen die Beförderung der Abbruchmassen vom Abbruchort zur Aufbereitungsanlage bzw. direkt zur Deponie sowie den Transport von der Aufbereitungsanlage der RC-Baustoffe zur Einbaustelle und der verwertbaren Fremdstoffe zum Abnehmer (z. B. Stahlwerk oder Müllverbrennungsanlage) sowie zur Deponie.

In der vorliegenden Kostenanalyse werden nur die genannten Ausgaben- und Einnahmengrößen berücksichtigt. Keine Berücksichtigung finden solche Kostenkomponenten, die für jedes Szenario im gleichen Maße anfallen und auch beim Einsatz von Primärrohstoffen ähnlich sind. Zu diesen szenarienunabhängigen Ausgaben gehören u.a. Kosten für Baustellensicherungen, Abstützungsmaßnahmen angrenzender Gebäude zur Verhinderung von Schäden oder eines Einsturzes beim Abbruch und den Einbau der RC-Baustoffe am Anwendungsort.

Nach Ermittlung der einzelnen Gesamtkosten der Szenarien wird der Gesamtkostenwert auf die maximal errechneten Kosten in allen Szenarien normiert:

$$GK_i = \frac{K_{ges,i}}{K_{ges,max}} \quad (F.7)$$

mit	GK_i	normierter Gesamtkostenwert des Szenarios i
	$K_{ges,i}$	Gesamtkosten des Szenarios i
	$K_{ges,max}$	maximal errechnete Kosten in allen Szenarien

6.7 Szenarienvergleich

Aus der für jedes Szenario ermittelten Gesamtwirksamkeit und den Kosten, kann das **Gesamtwirksamkeit-Kosten-Verhältnis** errechnet werden. Es bildet die Grundlage für den Szenarienvergleich durch Reihung der untersuchten Szenarien. Es gilt:

$$GKV_i = \frac{GW_i}{GK_i} \quad (F.8)$$

mit	GKV_i	Gesamtwirksamkeit-Kosten-Verhältnis des Szenarios i
	GW_i	Gesamtwirksamkeit des Szenarios i
	GK_i	Normierter Kostenwert des Szenarios i

Insgesamt soll eine große Gesamtwirksamkeit bei möglichst geringen Kosten erreicht werden. Je größer demnach der GKV_i -Wert eines Szenarios, desto höherwertiger im Sinne der Nachhaltigkeit ist das Szenario im Vergleich zu den anderen einzuordnen.

Die Reihung der Szenarien erfolgt mit Hilfe einer **Wirksamkeit-Kosten-Matrix**. Darin werden die Endergebnisse der Wirksamkeitsanalyse und der Kostenanalyse zusammengefasst und

vergleichend gegenübergestellt. Tab. 7.5 ist ein Beispiel für eine Wirksamkeit-Kosten-Matrix mit drei Szenarien. Einen Überblick zur Zusammenführung der Ergebnisse aus Wirksamkeitsanalyse und Kostenanalyse zum Endergebnis der Nachhaltigkeitsbewertung wird in Abb. 6.8 gegeben. Mit dem Zusammenführen der Teilwirksamkeiten zur Gesamtwirksamkeit und der abschließenden Ermittlung des Gesamtwirksamkeit-Kosten-Verhältnisses gehen wichtige Informationen verloren. So geben Gesamtwirksamkeit und GKV₁-Wert zur Höhe einzelner Teilwirksamkeiten und Teilkostenwerte keine Auskunft mehr. Aus diesem Grund werden hier die Teilergebnisse auch in der Wirksamkeit-Kosten-Matrix ausgewiesen. Herausragende Teilergebnisse bleiben dadurch weiter erkennbar. Unterstützend können Teilwirksamkeiten- und Teilkostendiagramme zur grafischen Auswertung erstellt werden. Zusätzliche Sensitivitätsanalysen ermöglichen durch Variation der Eingangsparameter das Erkennbar machen möglicher Unsicherheiten der im Vorfeld getroffenen Annahmen und Festlegungen (z. B. zur nutzerspezifischen Zielgewichtung) auf das Endergebnis.

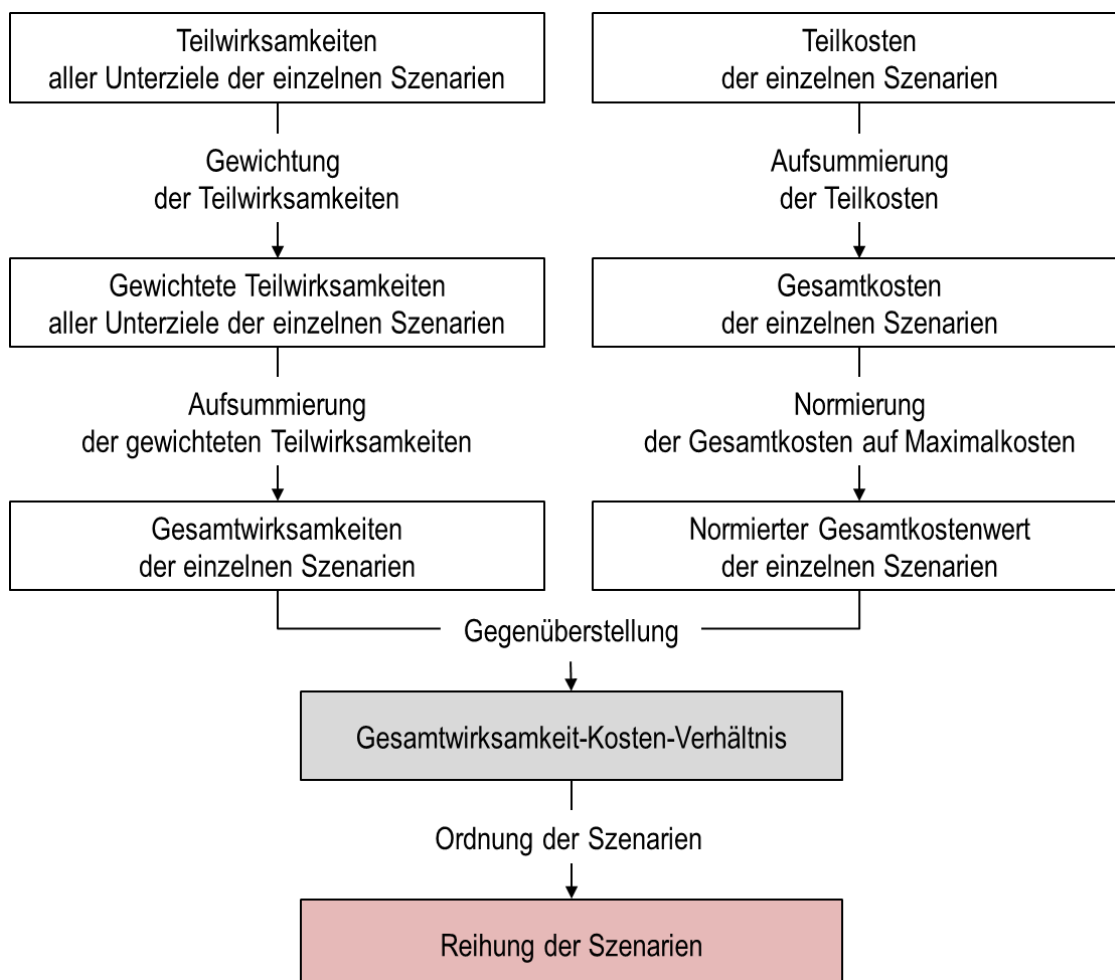


Abb. 6.8: Zusammenführung von Wirksamkeits- und Kostenanalyse zum Endergebnis

6.8 Eigenes Bewertungskonzept

Das Ergebnis der vorangegangenen Erarbeitungsschritte ist das in Abb. 6.9 schematisch dargestellte eigene Bewertungskonzept. Dieses Konzept ermöglicht dem Nutzer bei der Planung von Abbruchprojekten eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung verschiedener Gestaltungsvarianten des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk. In Kap. 7 wird die Anwendbarkeit des Konzepts exemplarisch demonstriert.

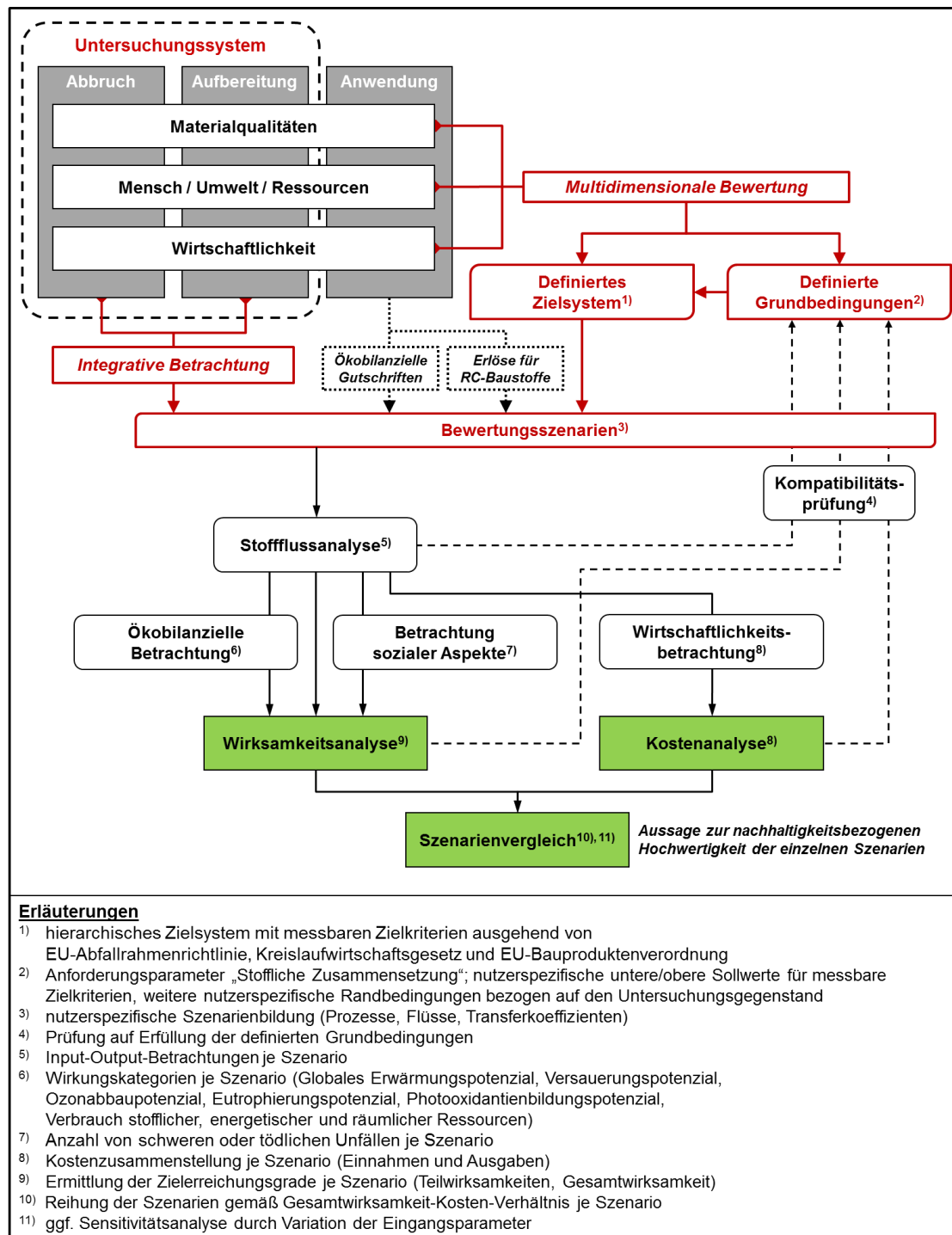


Abb. 6.9: Schematische Darstellung des eigenen Bewertungskonzepts

7 Exemplarische Anwendung des eigenen Bewertungskonzepts

7.1 Stoffflussanalyse, Ökobilanzierung, Betrachtung sozialer Aspekte

Das entwickelte Bewertungskonzept soll anhand einfacher Beispielbetrachtungen auf seine Anwendbarkeit hin überprüft werden. Gleichzeitig dienen die Beispielbetrachtungen als Anleitung für die Anwendung des Bewertungskonzepts. Die exemplarische Anwendung erfolgt gemäß schematischer Darstellung des Konzepts in Abb. 6.9. Eine umfassende Zielanalyse und die Definition von Grundbedingungen für die Bewertung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk erfolgten in Kap. 6. Die Beispielbetrachtungen beginnen mit der Stoffflussanalyse. Ausgangspunkt ist ein fiktives Bauwerk. Es wird der Gebäudetyp „Massivbau 1918 bis 1948“ nach Lippok & Korth [160] gewählt. Eine detaillierte Beschreibung des Beispielbauwerks erfolgt in Anhang 11.2.1. Die Beschreibung enthält Angaben zur Bauweise, Geometrie und stofflichen Zusammensetzung des Beispielbauwerks. Ausgehend von dem Untersuchungssystem (Abb. 6.4) und den weitergehenden Festlegungen in Kap. 6.4 und Anhang 11.2 werden die folgenden drei Bewertungsszenarien zusammengestellt:

- **Bewertungsszenario 1**
 - Abbruch: konventionell, maschinell
 - Aufbereitung von gemischtem Mauerwerkbruch: stationär, einstufig
 - Anwendung von aufbereitetem Mauerwerkbruch: gemäß Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“
- **Bewertungsszenario 2**
 - Abbruch: konventionell, maschinell
 - Aufbereitung von gemischtem Mauerwerkbruch: mobil
 - Anwendung von aufbereitetem Mauerwerkbruch: gemäß Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“
- **Bewertungsszenario 3**
 - Abbruch: teilselektiv, manuell/maschinell
 - Abbruch von Ziegelmauerwerk: selektiv, manuell
 - Abbruch von verbleibenden Bauteilen: konventionell, maschinell
 - Aufbereitung von Ziegelbruch: mobil
 - Aufbereitung von gemischtem Mauerwerkbruch: stationär, zweistufig
 - Anwendung von Ziegelbruch
 - Anwendung von aufbereitetem Mauerwerkbruch: gemäß Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“

Eine detaillierte Beschreibung der Szenarien erfolgt in Anhang 11.2.2. Sie umfasst die Auswahl der bei Abbruch und Aufbereitung eingesetzten Geräte sowie Annahmen für die anschließende Stoffflussanalyse und Ökobilanzierung. Aus den einzelnen Beschreibungen der Bewertungsszenarien werden die jeweiligen SFA-Modelle abgeleitet. Die drei verschiedenen SFA-Modelle sind in Abb. 7.1, Abb. 7.2 und Abb. 7.3 dargestellt. In Tab. 7.1, Tab. 7.2 und Tab. 7.3 sind die dazugehörigen Massenbilanzen der Materialflüsse sowie der Energieverbrauch (Diesel, elektrischer Strom) der einzelnen Abbruch-, Aufbereitungs- und Transportprozesse bezogen auf die funktionelle Einheit zusammengestellt. Darauf aufbauend werden die ökobilanziellen Betrachtungen und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen durchgeführt.

Für die Modellierung der Stoffströme sowie für die ökobilanziellen Betrachtungen wurde das kommerzielle Softwaretool GaBi 4.0 einschließlich der dazugehörigen GaBi-Datenbank mit Stand von 2006 genutzt. Die Auswertung erfolgte nach der Bewertungsmethode CML 2001 (Version 2007). Eine Übersicht zu den verwendeten Datensätzen findet sich im Anhang 11.2.4. In der zur Verfügung stehenden kommerziellen Datenbank sind die verwendeten Datensätze noch nicht mit LCWE-Daten zur Bewertung sozialer Aspekte hinterlegt. Aktuellere Versionen der genannten Datenbank enthalten bereits LCWE-Daten, die jedoch nicht frei verfügbar sind. Belastbare Daten darüber hinaus konnten nicht recherchiert werden. Somit konnte hier für das Oberziel „Arbeitnehmerschutz“ mit dem messbaren Zielkriterium „Anzahl schwerer und tödlicher Unfälle“ keine Auswertung vorgenommen werden. In der Wirkungsanalyse wurde die Teilwirksamkeit für dieses Zielkriterium deshalb für alle betrachteten Szenarien auf Null gesetzt.

7.2 Kompatibilitätsprüfung zur Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“

Im Anschluss an die Stoffflussanalyse werden die einzelnen Szenarien auf deren Kompatibilität zur Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“ geprüft. Weitere Grundbedingungen, d. h. zu prüfende Sollwerte, werden im Rahmen der Beispielbetrachtungen nicht definiert.

In Tab. 7.4 ist für jedes Szenario die stoffliche Zusammensetzung des jeweiligen Abbruchmaterials nach der Aufbereitung der Ausgangssituation gegenübergestellt. Gleichzeitig werden durch Abgleich mit den Grenzwerten aus Tab. 6.7 mögliche Anwendungsbereiche für die hergestellten RC-Baustoffe, vorbehaltlich nachgeordneter Eignungsprüfungen, identifiziert. Aus den Anwendungsbereichen ergeben sich als ökobilanzielle Gutschrift die durch den RC-Baustoff ersetzbaren Primärrohstoffe.

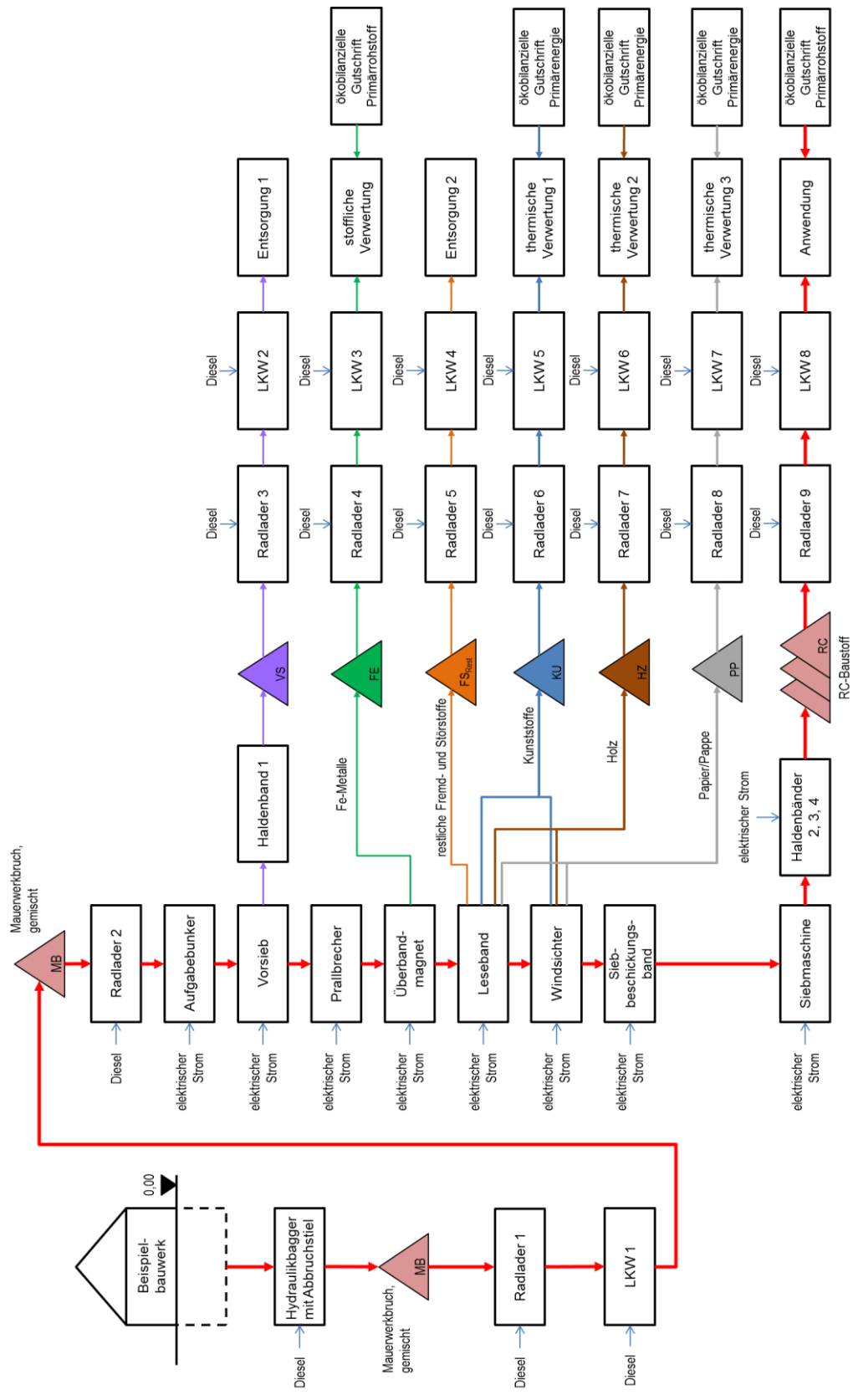


Abb. 7.1: SFA-Modell für Bewertungsszenario 1

Tab. 7.1: Prozessparameter für Abbruch, Aufbereitung und Transport in Beispielszenario 1

Abbruch-, Aufbereitungs- und Transportprozesse	Verbrauch Diesel	Verbrauch elektr. Strom	Inputflüsse, Materialmenge [t]							Outputflüsse, Materialmenge [t]								
	[lt]	[kWh/t]	MB	VS	FE	FS _{Rest}	KU	HZ	PP	RC	MB	VS	FE	FS _{Rest}	KU	HZ	PP	RC
Hydraulikbagger mit Abbruchstiel	0,47	-	256,6								256,6							
Radlader 1	0,10	-	256,6								256,6							
LKW 1	0,48	-	256,6								256,6							
Radlader 2	0,10	-	256,6								256,6							
Aufgebunker	-	0,150	256,6								256,6							
Vorsieb	-	0,036	256,6								231,0	25,6						
Halbband 1	-	0,040		25,6								25,6						
Radlader 3	0,10	-		25,6								25,6						
LKW 2	1,20	-		25,6								25,6						
Entsorgung 1	-	-		25,6								25,6						
Prallbrecher	-	1,600	231,0								231,0							
Überbandmagnet	-	0,109	231,0								227,4		3,6					
Radlader 4	0,10	-			3,6								3,6					
LKW 3	0,24	-			3,6								3,6					
stoffliche Verwertung	-	-			3,6								3,6					
Leseband	-	0,075	227,4								224,2			1,1	1,1	0,5	0,5	
Windsichter	-	0,385	224,2								223,8				0,2	0,1	0,1	
Radlader 5	0,10	-				1,1								1,1				
LKW 4	1,20	-				1,1								1,1				
Entsorgung 2	-	-				1,1								1,1				
Radlader 6	0,10	-					1,3								1,3			
LKW 5	0,24	-					1,3								1,3			
thermische Verwertung 1	-	-					1,3								1,3			
Radlader 7	0,10	-						0,6								0,6		
LKW 6	0,24	-						0,6								0,6		
thermische Verwertung 2	-	-						0,6								0,6		
Radlader 8	0,10	-							0,6								0,6	
LKW 7	0,24	-							0,6								0,6	
thermische Verwertung 3	-	-							0,6								0,6	
Siebbeschickungsband	-	0,110	223,8								223,8							
Siebmaschine	-	0,185	223,8								223,8							
Halbänder 2 bis 4	-	0,120	223,8															223,8
Radlader 9	0,10	-																223,8
LKW 8	2,16	-																223,8
Anwendung	-	-																223,8
MB... Mauerwerkbruch, gemischt; VS... Vorsiebmaterial; FE... Fe-Metalle; KU... Kunststoffe; HZ... Holz; PP... Papler/Pappe; RC... RC-Baustoff; FS _{Rest} ... restliche Fremd- und Störstoffe																		

MB... Mauerwerkbruch, gemischt; VS... Vorsiebmaterial; FE... Fe-Metalle; KU... Kunststoffe; HZ... Holz; PP... Papier/Pappe; RC... RC-Baustoff; FS_{Rest}... restliche Fremd- und Störstoffe

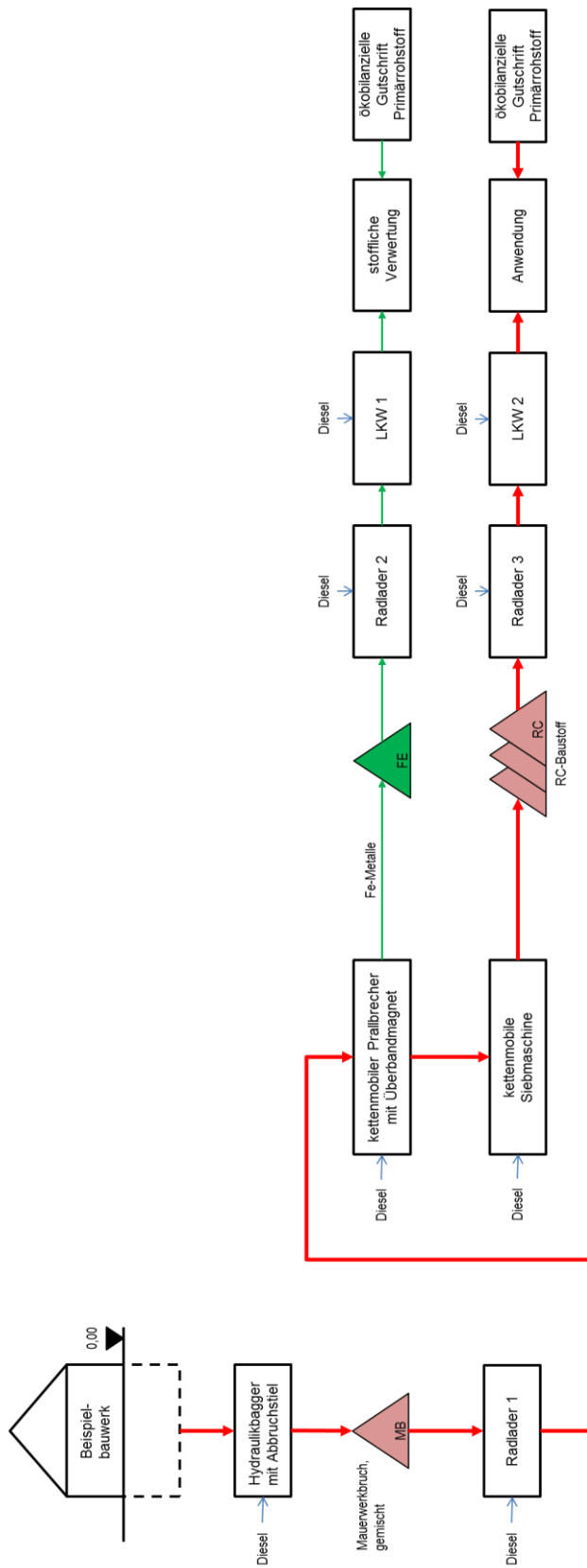


Abb. 7.2: SFA-Modell für Bewertungsszenario 2

Tab. 7.2: Prozessparameter für Abbruch, Aufbereitung und Transport in Beispielszenario 2

Abbruch-, Aufbereitungs- und Transportprozesse	Verbrauch Diesel	Verbrauch elektr. Strom	Inputflüsse, Materialmenge [t]									Outputflüsse, Materialmenge [t]								
	[lt]	[kWh/t]	MB	VS	FE	FS _{Rest}	KU	HZ	PP	RC	MB	VS	FE	FS _{Rest}	KU	HZ	PP	RC		
Hydraulikbagger mit Abbruchstiel	0,47	-	256,6								256,6									
Radlader 1	0,10	-	256,6								256,6									
kettenmobiler Prallbrecher mit Überbandmagnet	0,36	-	256,6								252,7		3,9							
Radlader 2	0,10	-			3,9								3,9							
LKW 1	0,24	-			3,9								3,9							
stoffliche Verwertung	-	-			3,9								3,9							
kettenmobile Siebmaschine	0,15	-	252,7								252,7							252,7		
Radlader 3	0,10	-								252,7								252,7		
LKW 2	0,53	-								252,7								252,7		
Anwendung	-	-								252,7								252,7		

MB... Mauerwerkbruch, gemischt; VS... Vorsiebmaterial; FE... Fe-Metalle; KU... Kunststoffe; HZ... Holz; PP... Papier/Pappe; RC... RC-Baustoff; FSRest... restliche Fremd- und Störstoffe

MB... Mauerwerkbruch, gemischt; VS... Vorsiebmaterial; FE... Fe-Metalle; KU... Kunststoffe; HZ... Holz; PP... Papier/Pappe; RC... RC-Baustoff; FS_{Rest}... restliche Fremd- und Störstoffe

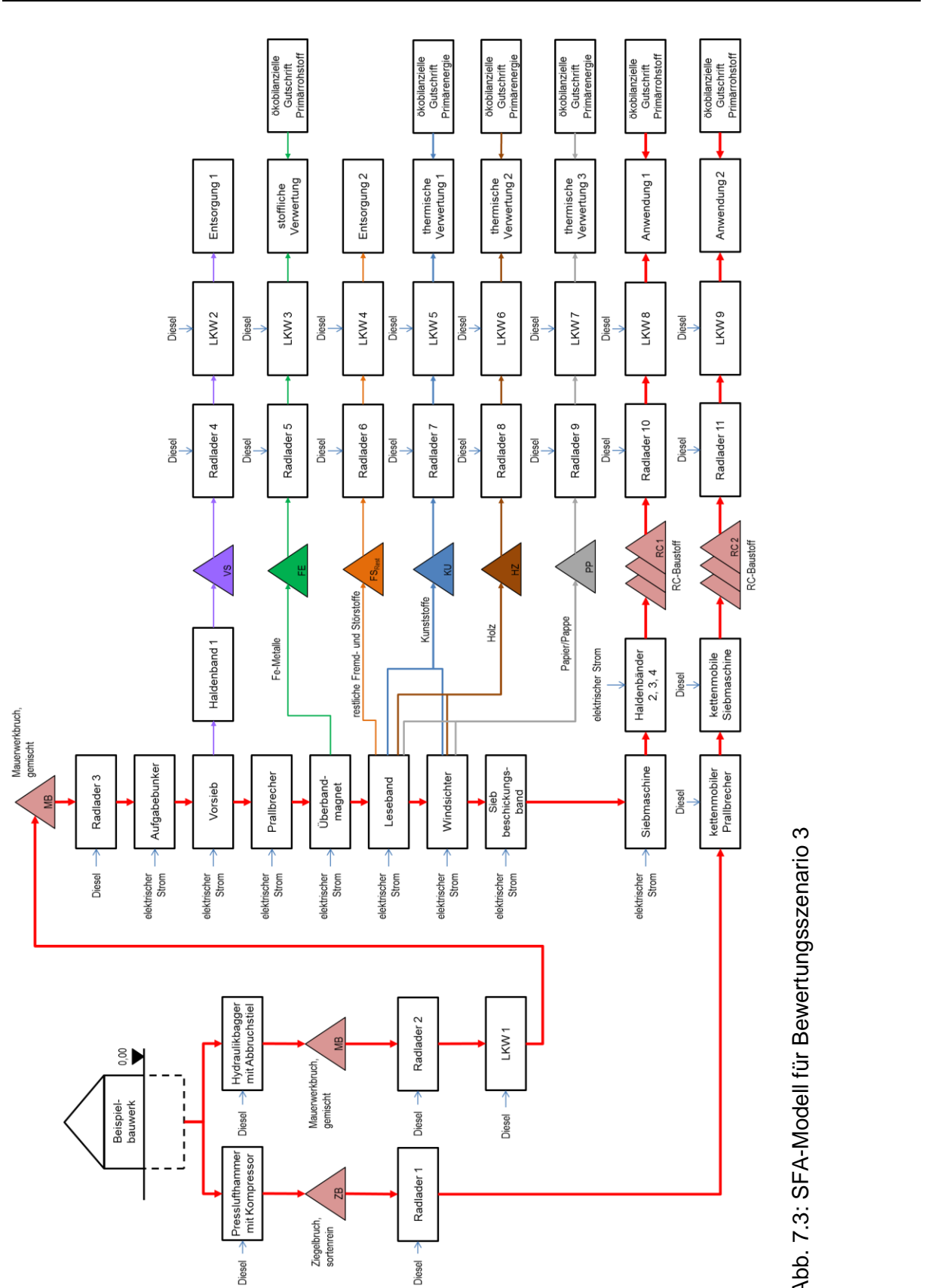


Abb. 7.3: SFA-Modell für Bewertungsszenario 3

Tab. 7.3: Prozessparameter für Abbruch, Aufbereitung und Transport in Beispielszenario 3

Abbruch-, Aufbereitungs- und Transportprozesse	Ver- brauch Diesel	Ver- brauch elektr. Strom	Inputflüsse, Materialmenge [t]										Outputflüsse, Materialmenge [t]									
	[lt]	[kWh/t]	MB	ZB	VS	FE	FS _{Rest}	KU	HZ	PP	RC	MB	ZB	VS	FE	FS _{Rest}	KU	HZ	PP	RC		
Presslufthammer mit Kompressor	2,90	-		49,0									49,0									
	0,10	-		49,0									49,0									
Radlader 1																						
Hydraulikbagger mit Abbruchstiel	0,47	-	207,6									207,6										
Radlader 2	0,10	-	207,6									207,6										
LKW 1	0,48	-	207,6									207,6										
Radlader 3	0,10	-	207,6									207,6										
Aufgabebunker	-	0,150	207,6									207,6										
Vorsieb	-	0,036	207,6									186,8		20,8								
Haldenband 1	-	0,040			20,8									20,8								
Radlader 4	0,10	-			20,8									20,8								
LKW 2	1,20	-			20,8									20,8								
Entsorgung 1	-	-			20,8									20,8								
Prallbrecher	-	1,600	186,8									186,8										
Überbandmagnet	-	0,109	186,8									183,2			3,6							
Radlader 5	0,10	-				3,6									3,6							
LKW 3	0,24	-				3,6									3,6							
stoffliche Verwertung	-	-				3,6									3,6							
Leseband	-	0,075	183,2									180,0				1,1	1,1	0,5	0,5			
Windsichter	-	0,385	180,0									179,6					0,2	0,1	0,1			
Radlader 6	0,10	-														1,1						
LKW 4	1,20	-														1,1						
Entsorgung 2	-	-														1,1						
Radlader 7	0,10	-						1,3									1,3					
LKW 5	0,24	-						1,3									1,3					
thermische Verwertung 1	-	-						1,3									1,3					
Radlader 8	0,10	-							0,6									0,6				
LKW 6	0,24	-							0,6									0,6				
thermische Verwertung 2	-	-							0,6									0,6				
Radlader 9	0,10	-								0,6									0,6			
LKW 7	0,24	-																	0,6			
thermische Verwertung 3	-	-																	0,6			

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite.

Tab. 7.3: Prozessparameter für Abbruch, Aufbereitung und Transport in Beispielszenario 3

Abbruch-, Aufbereitungs- und Transportprozesse	Verbrauch Diesel	Verbrauch elektr. Strom	Inputflüsse, Materialmenge [t]										Outputflüsse, Materialmenge [t]									
	[lt]	[kWh/t]	MB	ZB	VS	FE	FS _{Rest}	KU	HZ	PP	RC	MB	ZB	VS	FE	FS _{Rest}	KU	HZ	PP	RC		
Siebbeschickungsband	-	0,110	179,6									179,6										
Siebmaschine	-	0,185	179,6									179,6										
Haltenbänder 2 bis 4	-	0,120	179,6																			
Radlader 10	0,10	-									179,6									179,6		
LKW 8	2,16	-									179,6									179,6		
Anwendung 1	-	-									179,6									179,6		
kettenmobiler Prallbrecher	0,36	-		49,0									49,0									
kettenmobile Siebmaschine	0,15	-		49,0																49,0		
Radlader 11	0,10	-									49,0									49,0		
LKW 9	0,24	-									49,0									49,0		
Anwendung 2	-	-									49,0									49,0		
MB... Mauerwerkbruch, gemischt; ZB... Ziegelbruch, sortenrein; VS... Vorsiebmaterial; FE... Fe-Metalle; KU... Kunststoffe; HZ... Holz; PP... Papier/Pappe; RC... RC-Baustoff; FS _{Rest} ... restliche Fremd- und Störstoffe																						

Tab. 7.4: Kompatibilitätsprüfung zur Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“

Stoffgruppen	Mengenabschätzung				
	Ausgangssituation	nach Aufbereitung			
		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	
		Mauerwerkbruch, gemischt [Ma.-%]	Mauerwerkbruch, gemischt [Ma.-%]	Mauerwerkbruch, gemischt [Ma.-%]	Ziegelbruch, sortenrein [Ma.-%]
Beton und Gesteinskörnungen	32,9	34,0	33,4	42,3	0,0
Klinker und Mauerziegel inkl. Putze und Mörtel	63,6	65,7	64,6	57,3	100,0
Fe-Metalle	1,7	0,2	0,2	0,2	0,0
Kunststoffe	0,6	0,04	0,6	0,05	0,0
Papier/Pappe	0,3	0,01	0,3	0,01	0,0
Holz	0,3	0,01	0,3	0,01	0,0
Weiteres (z. B. Glas)	0,6	0,13	0,6	0,14	0,0
Auswahl des möglichen Anwendungsbereichs*		rezyklierte Gesteinskörnung für Beton, Liefertyp 4	mineralische Dämm-schüttung	rezyklierte Gesteinskörnung für Beton, Liefertyp 4	Zierkies
Auswahl der möglichen Materialgutschrift		natürliche Gesteinskörnung	natürliche Gesteinskörnung	natürliche Gesteinskörnung	natürliche Gesteinskörnung

* vorbehaltlich nachgeordneter Eignungsprüfungen

7.3 Wirksamkeitsanalyse für die Beispielszenarien

Im Rahmen der Stoffflussanalyse und der Ökobilanzierung werden je Szenario die Ausprägungen der folgenden Zielkriterien quantifiziert:

- Globales Erwärmungspotenzial, auch Treibhauspotenzial,
- Versauerungspotenzial,
- Ozonabbaupotenzial,
- Eutrophierungspotenzial, auch Überdüngungspotenzial,
- Photooxidantienbildungspotenzial, auch: Sommersmogpotenzial ,
- Mengen erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergie,
- Materialmengen für die Stoffflüsse.

Nach der Quantifizierung der Zielkriterien folgt gemäß Bewertungskonzept die Wirksamkeitsanalyse. Durch Betrachtung der minimal und maximal beobachteten Ausprägungen eines Zielkriteriums werden die Teilwirksamkeiten bestimmt. In Anhang 11.2.5 sind die je Szenario ermittelten Ausprägungen und Teilwirksamkeiten der definierten Zielkriterien zusammengestellt. Die Gewichtung der einzelnen Teilwirksamkeiten und die Zusammenführung der einzelnen Teilwirksamkeiten zur Gesamtwirksamkeit erfolgt in der Wirksamkeit-Kosten-Matrix in Kap. 7.5 (Tab. 7.5).

7.4 Kostenanalyse für die Beispielszenarien

Die Kostenanalyse für die einzelnen Bewertungsszenarien wird ausgehend von der Stoffflussanalyse durchgeführt. Folgende Kostenwerte werden für die Beispielszenarien ermittelt:

- Abbruchkosten,
- Aufbereitungskosten,
- LKW-Transportkosten,
- Entsorgungskosten,
- Erlöse.

Für die Ermittlung der Abbruchkosten wird das EDV-Programm „Kostenermittlung für Rückbau- und Abbrucharbeiten“ der LUBW [161] genutzt. Das EDV-Programm ermöglicht eine Grobermittlung der Abbruchkosten für einen konventionellen, teilselektiven oder selektiven Abbruch anhand des Gebäudevolumens (Brutto-Rauminhalt, BRI) und des Gebäudetyps (stoffliche Zusammensetzung). Die Kostenermittlung für die Aufbereitung erfolgt wiederum mit Hilfe des Webtools „Nachhaltigkeitsanalyse für das Mauerwerksrecycling“ nach Herbst et al. [126]. Das Webtool ermöglicht die Bestimmung der Aufbereitungskosten für Mauerwerkbruch in Abhängigkeit von der jeweiligen Konfiguration einer mobilen bzw. stationären Aufbereitungsanlage. Zur Konfiguration gehören Art und Anzahl der einzelnen Anlagenkomponenten sowie die Jahresproduktion und Anlagenauslastung. Die Eingabeparameter für EDV-Programm und Webtool ergeben sich aus den Festlegungen zur Stoffflussanalyse in Anhang 11.2.1, Anhang 11.2.2 und Anhang 11.2.3. Die Erlöse für RC-Baustoffe und etwaige Entsorgungskosten ergeben sich aus der Massenbilanz im Zuge der Stoffflussanalyse.

Die Kostenermittlung für die einzelnen Bewertungsszenarien erfolgt tabellarisch im Anhang 11.2.6. Die Berechnungstabellen Tab. 11.9, Tab. 11.10, Tab. 11.11, Tab. 11.12 und Tab. 11.13 enthalten die ermittelten Kostenwerte und Erlöse. Eine Zusammenführung und Gegenüberstellung der relevanten Einzelergebnisse erfolgt in der Wirksamkeit-Kosten-Matrix in Kap. 7.5 (Tab. 7.5), in der auch der normierte Gesamtkostenwert für jedes Szenario als Endergebnis der Kostenanalyse angegeben ist.

7.5 Vergleich der Beispielszenarien

Auf Basis des hier definierten Zielsystems sowie der getroffenen Annahmen und Festlegungen für die Beispielszenarien ergeben sich die in der Wirksamkeit-Kosten-Matrix (Tab. 7.5) zusammengefassten Ergebnisse. Andere Annahmen und Festlegungen führen zu anderen Ergebnissen bei der Wirksamkeitsanalyse und der Kostenanalyse.

Tab. 7.5: Wirksamkeit-Kosten-Matrix für die Beispielszenarien

	Unterziele			Bewertungsszenarien					
	Nr.	Beschreibung	Gew. [%]	1		2		3	
				Teilwirk- samkeit	gewichtet	Teilwirk- samkeit	gewichtet	Teilwirk- samkeit	gewichtet
Wirksamkeitsanalyse	Z1.1.1.1	Minimierung von Treibhausgasen verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	3	0,00	0,00	0,80	0,02	1,00	0,03
	Z1.1.1.2	Maximierung der Einsparung von Treibhausgasen durch Einsatz von RC-Baustoffen	3	0,89	0,03	1,00	0,03	0,00	0,00
	Z1.1.1.3	Maximierung der Einsparung von Treibhausgasen durch stoffliche Verwertung von Fremdstoffen	3	0,92	0,03	1,00	0,03	0,00	0,00
	Z1.1.1.4	Maxim. des Differenzwertes zwischen eingesparten und verursachten Mengen an Treibhausgasen	8	0,00	0,00	1,00	0,08	0,77	0,06
	Z1.1.2.1	Minimierung saurer Emissionen verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	1	1,00	0,01	0,00	0,00	0,96	0,01
	Z1.1.2.2	Maximierung der Einsparung saurer Emissionen durch Einsatz von RC-Baustoffen	1	0,00	0,00	1,00	0,01	0,17	0,00
	Z1.1.2.3	Maxim. der Einsparung saurer Emissionen durch stoffliche Verwertung von Fremdstoffen, wie Eisen	1	0,00	0,00	1,00	0,01	0,00	0,00
	Z1.1.2.4	Maxim. des Differenzwertes zwischen eingesparten und verursachten Mengen an sauren Emissionen	4	0,90	0,04	0,00	0,00	1,00	0,04
	Z1.1.3.1	Minimierung von ozonzerstörenden Gasen verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	1	1,00	0,01	0,00	0,00	0,80	0,01
	Z1.1.3.2	Maximierung der Einsparung von ozonzerstörenden Gasen durch Einsatz von RC-Baustoffen	1	0,00	0,00	1,00	0,01	0,17	0,00
	Z1.1.3.3	Maxim. der Einsparung von ozonzerstörenden Gasen durch stoffliche Verwertung von Fremdstoffen	1	0,00	0,00	1,00	0,01	0,00	0,00
	Z1.1.3.4	Maxim. des Differenzwertes zwischen eingesparten und verursachten Mengen ozonzerstörender Gase	4	0,80	0,03	0,00	0,00	1,00	0,04
	Z1.1.4.1	Minimierung eutrophierender Substanzen verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	3	1,00	0,03	0,00	0,00	0,96	0,03
	Z1.1.4.2	Maximierung der Einsparung eutrophierender Substanzen durch Einsatz von RC-Baustoffen	3	0,00	0,00	1,00	0,03	0,17	0,00
	Z1.1.4.3	Maxim. der Einsparung eutrophierender Substanzen durch stoffliche Verwertung von Fremdstoffen	3	0,00	0,00	1,00	0,03	0,00	0,00
	Z1.1.4.4	Maxim. des Differenzwertes zwischen eingesparten und verursachten Mengen eutroph. Substanzen	7	0,91	0,06	0,00	0,00	1,00	0,07
	Z1.1.5.1	Minimierung von bodennah ozonbildenden Gasen bei Abbruch, Aufbereitung und Transport	1	0,98	0,01	0,00	0,00	1,00	0,01
	Z1.1.5.2	Maximierung der Einsparung bodennah ozonbildender Gase durch Einsatz von RC-Baustoffen	1	0,00	0,00	1,00	0,01	0,17	0,00
	Z1.1.5.3	Maxim. der Einsparung bodennah ozonbildender Gase durch stoffliche Verwertung von Fremdstoffen	1	0,00	0,00	1,00	0,01	0,00	0,00
	Z1.1.5.4	Maxim. des Differenzwertes zw. eingesparten u. verursachten Mengen bodennah ozonbildender Gase	4	0,99	0,04	0,00	0,00	1,00	0,04
	Z2.1.1	Minimierung der Anzahl schwerer und tödlicher Unfälle	6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Z2.1.1.1	Minimierung des Primärenergiebedarfs bei Abbruch, Aufbereitung und Transport	2	0,04	0,00	1,00	0,02	1,00	0,02
	Z2.1.1.2	Maximierung der Energieeinsparung in der Primärrohstoffproduktion durch Einsatz von RC-Baustoffen	2	0,00	0,00	1,00	0,02	0,17	0,00
	Z2.1.1.3	Maxim. der Energieeinsparung in der Primärrohstoffproduktion durch stoffl. Verwertung von Fremd- st.	2	0,00	0,00	1,00	0,02	0,00	0,00
	Z2.1.1.4	Maximierung der Energiegewinnung durch thermische Verwertung von Fremdstoffen, wie Kunststoffen	2	1,00	0,02	0,00	0,00	1,00	0,02
	Z2.1.1.5	Maxim. des Differenzwertes zwischen eingesparten/gewonnenen und verbrauchten Energiemengen	8	0,05	0,00	1,00	0,08	0,00	0,00
	Z2.2.1.1	Maximierung des Einsatzes von RC-Baustoffen	4	0,00	0,00	1,00	0,04	0,17	0,01
	Z2.2.1.2	Maximierung der stofflichen Verwertung von Fremdstoffen	4	0,00	0,00	1,00	0,04	0,00	0,00
	Z2.2.1.3	Maxim. der Einsparung stoffl. Ressourcen durch RC-Baustoffe und stoffl. Verwertung von Fremd- st.	8	0,00	0,00	1,00	0,08	0,16	0,01
	Z2.3.1.1	Minimierung der zu entsorgenden Materialmengen	8	0,00	0,00	1,00	0,08	0,82	0,07
	Gesamtwirksamkeit			Σ:	0,31	Σ:	0,66	Σ:	0,48
	Reihung nach Gesamtwirksamkeit			3		1		2	
Kostenanalyse	Szenarien			1		2		3	
	Ausgaben	Abbruchkosten in [€]		2.187,00		2.187,00		4.374,00	
		Aufbereitungskosten in [€]		1.911,67		1.347,15		1.803,87	
		LKW-Transportkosten in [€]		1.350,00		96,00		1.260,00	
		Entsorgungskosten in [€]		332,80		0,00		270,40	
	Einnahmen	Erlöse in [€]		1.551,00		720,70		1.575,00	
		Gesamtkosten		4.230,47		2.909,45		6.133,27	
		Normierter Gesamtkostenwert		0,69		0,47		1,00	
		Reihung nach Gesamtkostenwert		2		1		3	
Endergebnis	Szenarien			1		2		3	
	Gesamtwirksamkeit-Kosten-Verhältnis			0,45		1,40		0,48	
	Reihung nach Gesamtwirksamkeit-Kosten-Verhältnis			> 3 <		> 1 <		> 2 <	

Nach den ermittelten Werten für das Gesamtwirksamkeit-Kosten-Verhältnis ist das Bewertungsszenario 2 als das hochwertigste im Sinne der Nachhaltigkeitsinterpretation dieser Arbeit anzusehen. Die Bewertungsszenarien 1 und 3 weisen wesentlich geringere Verhältniswerte auf. Dies steht im Einklang zu der gegenüber Szenario 2 komplexeren Aufbereitungstechnik und den Mehraufwendungen für Transporte. Mit steigender Komplexität der Abbruch- und Aufbereitungstechnik nehmen die verursachten Umweltwirkungen zu. Gleiches gilt für die Transportaufwendungen. Dennoch können durch geeignete Maßnahmen zur Fremd- und Störstoffentfrachtung bei Abbruch und Aufbereitung die Qualität der RC-Baustoffe und somit die erzielbaren Erlöse positiv beeinflusst werden. Zudem können größere Mengen von verwertbaren Fremdstoffen, wie Holz und Kunststoffe, abgetrennt und einer Verwertung zuge-

führt werden. Dadurch können größere Mengen Primärrohstoffe und Primärenergie eingespart werden, was insgesamt zur Verringerung der Umweltwirkungen beiträgt. Dies zeigen auch die Gesamtwirksamkeiten für die Szenarien 1 und 3. Szenario 3 ist zwar mit Mehraufwendungen für Abbruch und Aufbereitung verbunden. Die Ökobilanz fällt jedoch positiver als bei Szenario 1 aus. Letztlich ist das Szenario 3 trotz der höheren Kosten gegenüber Szenario 1 als hochwertiger im Sinne der Nachhaltigkeit zu betrachten.

Abschließend kann festgehalten werden, dass, wie eingangs erläutert, die Bewertung der Nachhaltigkeit für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk nicht allein an den Kosten und dem vermeintlichen Nutzen des Anwendungsbereiches der RC-Baustoffe festzumachen ist. Die Hochwertigkeit ist ebenso wenig mit höheren Anforderungen an die Materialqualität für den neuen Anwendungsbereich des RC-Baustoffs zu verwechseln. Die Beispielbetrachtungen machen dies deutlich.

8 Abschließende Einschätzung des eigenen Bewertungskonzepts

8.1 Anwendbarkeit und Einordnung in bisherige Arbeiten

Die Beispielbetrachtungen bestätigen die Anwendbarkeit des erarbeiteten Bewertungskonzepts. Das Konzept bietet dem Nutzer mit den implementierten Analyseinstrumenten einen festen methodischen Rahmen für eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung alternativer Szenarien der Lebensendphase von Mauerwerk. Es erlaubt dabei dennoch nutzerspezifische Anpassungen beim Zielsystem, wie die Festlegung von Unterzielen und deren Gewichtungen, sowie die Formulierung von zusätzlichen Grundbedingungen.

Das definierte Untersuchungssystem „Abbruch und Aufbereitung von Mauerwerk“ (Kap. 6.4) umfasst die Module C1-C4 „Entsorgungsphase“ und D „Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen“ im Lebenszyklus von Gebäuden und Bauprodukten nach DIN EN 15804 [58] (Abb. 8.1). Die Arbeit gibt Auskunft und weiterführende Informationen zu Abbruch- und Aufbereitungsalternativen, Anwendungsmöglichkeiten für Abbruchmaterialien aus Mauerwerk, den dazugehörigen Anforderungen an das Abbruchmaterial und den daraus hergestellten RC-Baustoff, zu möglichen Substitutionsmengen von Primärrohstoffen und somit Gutschriften (Modul D) für die Module C1-C4. Die zur Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden herangezogenen Umweltproduktdeklarationen nach DIN EN 15804 [58] und DIN EN ISO 14025 [70] geben, bedingt durch ihre Systemgrenze, nur durch verbale Beschreibungen Auskunft zur Recyclingfähigkeit der jeweiligen Bauprodukte. Die vorliegende Arbeit bildet damit eine Ergänzung zu den Umweltproduktdeklarationen für Mauerwerkbaustoffe [131] sowie zur aktuellen Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden, wie dem Deutschen Gütesiegel Nachhaltiges Bauen des BMUB und der DGNB [37].

Die Erkenntnisse bisheriger Arbeiten zur Lebensendphase von Bauwerken (Tab. 2.21) wurden bei der Erarbeitung des Bewertungskonzepts berücksichtigt und gleichzeitig auf diesem Weg ergänzt. Anders als in vergleichbaren mauerwerksbezogenen Studien bezieht das Konzept die Bewertungsdimensionen „Materialqualität“, „Mensch/Umwelt/Ressourcen“ und „Wirtschaftlichkeit“ gleichzeitig ein. Das Konzept geht zudem über eine vergleichende Einzelbewertung von Wirkungskategorien und Kosten hinaus. Dafür wurde hier die nach Brunner et al. [23] modifizierte Kosten-Wirksamkeitsanalyse herangezogen. Entsprechende Festlegungen und Annahmen bezogen auf das Untersuchungssystem „Abbruch und Aufbereitung von Mauerwerk“ wurden getroffen. Die Kosten-Wirksamkeitsanalyse mit Bildung eines Gesamtwirksamkeit-Kosten-Verhältnisses ermöglicht eine eindeutige Reihung alternativer Szenarien. Die Kosten-Wirksamkeitsanalyse wurde auch bei den abfallwirtschaftlichen Studien von Brunner et al. [23] und Clement et al. [33] herangezogen. Die methodischen Unterschiede zwischen den beiden österreichischen Studien und der eigenen Arbeit sind in Tab. 8.1 zusammenfassend gegenübergestellt.

A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	D
Herstellungsphase	Errichtungsphase	Nutzungsphase	Entsorgungsphase	Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen
A1 Rohstoff-bereitstellung A2 Transport A3 Herstellung	A4 Transport A5 Bau/Einbau	B1 Nutzung B2 Instandhaltung B3 Reparatur B4 Ersatz B5 Umbau/ Erneuerung	C1 Abbruch C2 Transport C3 Abfallbewirt-schaftung C4 Deponierung	D Wiederver-wendungs-, Rückgewinnungs- und Recycling-potenzial
Umweltprodukt-deklaration (EPD)		B6 Betrieblicher Energieeinsatz	Untersuchungssystem	
Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden		B7 Betrieblicher Wassereinsatz		

Abb. 8.1: Untersuchungssystem im Kontext des modularen Lebenszyklus' von Gebäuden

8.2 Grenzen des Bewertungskonzepts

Die Grenzen des erarbeiteten Bewertungskonzepts ergeben sich aus dem Bewertungsansatz, der Analysemethode, den implementierten Analyseinstrumenten und den damit verbundenen Festlegungen, aber auch der Abhängigkeit von entsprechenden Daten zur Durchführung der einzelnen Bewertungsschritte. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Individualität und Komplexität der Abbruch- und Aufbereitungstechnik erschweren die Bewertung. Die Modellierung erfordert in Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit die Festlegung von Vereinfachungen und Annahmen. Die komplexe Anlagentechnik

lässt sich mit einem Stoffflussmodell zwar nicht vollständig, jedoch hinreichend genau beschreiben.

- Das definierte Zielsystem adressiert die Bewertungsdimensionen „Materialqualitäten“, „Mensch/Umwelt/Ressourcen“ und „Wirtschaftlichkeit“. Aufgrund der Komplexität des Untersuchungssystems „Abbruch und Aufbereitung von Mauerwerk“ können jedoch nicht alle Aspekte der drei Bewertungsdimensionen berücksichtigt werden.
- Das Zielsystem wird auf den Ebenen der Generalziele und Oberziele mitsamt der Gewichtung vorgegeben. Die darunter liegenden Zielebenen können nutzerspezifisch angepasst werden. Damit erhält das Zielsystem auf den unteren Ebenen einen subjektiven Charakter. Jedoch ermöglichen zusätzliche Sensitivitätsanalysen durch Variation der nutzerspezifischen Zielgewichtung und anderer Eingangsparameter das Erkennbarmachen möglicher auf das Endergebnis bezogener Unsicherheiten.
- Das Zielsystem stützt sich auf naturwissenschaftlich bestimmbare Zielkriterien. So verbleiben trotz der Berücksichtigung zahlreicher Auswirkungen immer nicht messbare Aspekte, die über den Rahmen des Bewertungskonzepts hinausgehen, jedoch für Entscheidungen relevant sein können. Dazu gehören insbesondere sozialpolitische Randbedingungen. Diese müssen verbal beschreibend bewertet werden.
- Die Vorhersage der Materialqualität während der Planung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk ist begrenzt. Qualitätsanforderungen an die RC-Baustoffe und deren Ausgangsstoffe lassen sich deshalb nur bedingt in das Bewertungskonzept integrieren. Vorliegend wurde als Qualitätsanforderung die Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“ eingeführt. Die Umweltverträglichkeit und andere Qualitätsparameter, wie Rohdichte und Korngrößenverteilung, sind im Rahmen der Eignungsprüfung für die einzelnen Anwendungsbereiche zu prüfen.
- Die Bewertung ist derzeit auf die Betrachtung der Bereitstellung (Abbruch und Aufbereitung) von einer Tonne Mauerwerkbruch für alternative Anwendungen ausgelegt. Die Endprodukte in den jeweiligen Anwendungsbereichen (z. B. ein Kubikmeter Beton oder ein Kilometer Straße) und die Entsorgung sowie die damit verbundenen ökologischen, ökonomischen und technischen Aufwendungen bleiben unberücksichtigt. Der Vergleich von Primärrohstoff und Sekundärrohstoff auf Baustoffebene (z. B. Gesteinskörnung) erfolgt jedoch über ökobilanzielle Gutschriften für den ersetzten Primärrohstoff und für Energiegewinnung durch thermische Verwertung bezogen auf eine Tonne Abbruchmaterial.
- Die zukünftige Anwendbarkeit des Bewertungskonzepts erfordert eine ständige Anpassung an methodische, analytische und technische Weiterentwicklungen sowie Änderungen im Normen- und Regelwerk. Dazu gehören u. a. die Einführung neuer Zielkriterien, Entwicklung neuer Technologien bei Abbruch und Aufbereitung, Erweiterung des

Anwendungsspektrums, Erweiterung der Datengrundlage und Änderungen bestehender Grenzwerte.

- Das mengenmäßige Angebot geeigneter RC-Baustoffe und deren Bedarf in einzelnen Anwendungsbereichen blieben aufgrund unvollständiger Statistiken zu Anfallmengen, Qualitäten von Abbruchmaterialien und deren Nachfrage unberücksichtigt.
- Mauerwerk ist nicht der alleinige Baustoff in Bauwerken. Aus dieser Perspektive leisten die Ergebnisse des erarbeiteten Konzepts zunächst nur einen begrenzten Beitrag zur Gesamtbewertung von Bauwerken.
- Das Durchführen der einzelnen Analyseschritte des Konzepts ist sehr umfangreich. Dies ist bei der Abschätzung des Planungsaufwands zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund könnte die Entscheidung über den Einsatz des Konzepts vom Mindest-Brutto-Rauminhalt des Abbruchobjektes abhängig gemacht werden.
- Insgesamt unterstützt das Bewertungskonzept die Entscheidungsfindung zur Planung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk. Es ersetzt jedoch keine detaillierten Untersuchungen und Kalkulationen einzelner Projekte.

Tab. 8.1: Gegenüberstellung der Studien von Brunner et al. [23] und Clement et al. [33] mit der eigenen Arbeit

	Studie von Brunner et al. [23]	Studie von Clement et al. [33]	Eigene Arbeit
Gegenstand der Arbeit	Bewertung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen für Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen sowie für kommunalen Klärschlamm in Österreich	Bewertung unterschiedlicher Szenarien der Behandlung von Baurestmassen in Österreich	Ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk
Analysemethode	Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA)	Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA)	KWA nach Brunner et al. [23], angepasst und erweitert
Modifikation	Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis zur Reihung der Alternativen (maximale Gesamtwirksamkeit bei minimalen Gesamtkosten)	keine	Gesamtwirksamkeit-Kosten-Verhältnis zur Reihung der Alternativen (maximale Gesamtwirksamkeit bei minimalen Gesamtkosten) zusätzliche Ergebnistransparenz durch grafische Aufbereitung der Teilwirksamkeiten und Teilkostenwerte
Zielsystem	gemäß EU-Abfallrahmenrichtlinie und österreichischem Abfallwirtschaftsgesetz		gemäß EU-Abfallrahmenrichtlinie, deutschem KrWG und EU-Bauproduktenverordnung
Nebenbedingungen	keine		Einführung der Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“; Aufzeigen weiterer möglicher Grundbedingungen
Hauptziel (Generalziel) „Schutz der menschlichen Gesundheit und Umwelt“	Berücksichtigung durch formulierte Ziele: • „Verringerung der Schadstoffkonzentrationen (Boden, Grundwasser)“ ohne Berücksichtigung von Grenzwerten (Verträglichkeit) • „Verhinderung Treibhauseffekt und Ozonabbau“	Berücksichtigung von	<ul style="list-style-type: none"> • Ziele formuliert unter Verwendung anerkannter LCA-Wirkungskategorien, wie Treibhauspotenzial und Eutrophierungspotenzial • ausgewählte Grenzwerte berücksichtigt bei der Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“
Hauptziel (Generalziel) „Ausreichende Materialqualität“	nicht relevant	Berücksichtigung als Oberziel „Erhaltung der Qualität der RC- Baustoffe“; Verträglichkeit der Schadstoffkonzentrationen in RC- Baustoffen als Ziel „Gewährleistung einer guten ökologischen Qualität der RC-Baustoffe“ formuliert; „Technische Eignungskriterien“ zwar als Ziel formuliert, letztlich jedoch nicht untersucht	Berücksichtigung durch Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“
Zielgewichtung	Priorisierung gemäß EU-Abfallrahmenrichtlinie und österreichischem Abfallwirtschaftsgesetz, abgeleitet aus Literatur und Expertenbefragungen		Priorisierung gemäß EU-Abfallrahmenrichtlinie und deutschem Kreislaufwirtschaftsgesetz, abgeleitet aus Literatur
Normierung von Wirksamkeiten und Kosten	Normierung an Referenzszenario „Planungsnullfall“	Normierung an Referenzszenario „suboptimales Szenario“	<ul style="list-style-type: none"> • kein Referenzszenario • Ermittlung der Teilwirksamkeiten anhand minimal und maximal beobachteter Ausprägungen • Normierung des Gesamtkostenwerts auf die maximal errechneten Kosten in allen Szenarien

9 Zusammenfassung und Ausblick

Vor dem Hintergrund des nachhaltigen Bauens hat sich ein lebenszyklusorientiertes Denken im Bauwesen etabliert. Der Lebenszyklus von Mauerwerk endet mit dessen Entsorgung nach der Nutzungsphase. Die Lebensendphase umfasst den Abbruch des Mauerwerks sowie die Aufbereitung und spätere Anwendung der anfallenden Abbruchmassen. Im Sinne der EU-Abfallrahmenrichtlinie, dem Kreislaufwirtschaftsgesetz und der EU-Bauproduktenverordnung sind die Abbruchmassen einer möglichst hochwertigen Anwendung zuzuführen. Die Wertigkeit der Nachhaltigkeit stellt einen Summenwert aus einer Vielzahl einzelner Bewertungskriterien dar. Neben baustoff- und anlagentechnischen Fragestellungen müssen ökologische, soziale und ökonomische Aspekte berücksichtigt werden. Dies erfordert eine ganzheitliche Betrachtung der Bewertungsdimensionen „Materialqualität“, „Mensch/Umwelt/Ressourcen“ und „Wirtschaftlichkeit“.

Mit der vorliegenden Arbeit wurde ein multidimensionales Bewertungskonzept erarbeitet, das bereits während der Planung von Abbruchprojekten eine einzelfallbezogene Nachhaltigkeitsbewertung potenzieller Gestaltungsvarianten (Szenarien) der Lebensendphase von Mauerwerk ermöglicht. Das Bewertungskonzept basiert im Kern auf der Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA), mit der sowohl monetäre als auch nicht monetäre Effekte beurteilt werden können. Die KWA setzt sich im Wesentlichen aus Zielanalyse, Wirksamkeitsanalyse und Kostenanalyse zusammen. Ausgangspunkt ist die Zielanalyse, in der ein klares Zielsystem festgelegt wird. Es wurde hier eine auf die Bewertung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk bezogene Zielanalyse durchgeführt. Dabei wurden aus der EU-Abfallrahmenrichtlinie, dem Kreislaufwirtschaftsgesetz und der EU-Bauproduktenverordnung die vier Generalziele Z1 „Mensch und Umwelt“, Z2 „Ressourcenschonung“, Z3 „Ausreichende Materialqualität“ sowie Z4 „Wirtschaftlichkeit“ als oberste Zielebene des Zielsystems abgeleitet. Die Analyse dieser Generalziele erfolgt über eine integrierte Betrachtung des Abbruchs und der Aufbereitung mit Blick auf die Anwendung des Mauerwerkbruchs. Dabei kommen verschiedene Analyseinstrumente zum Einsatz, wie die Stoffflussanalyse, ökobilanzielle Betrachtungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Für die Durchführung der verschiedenen Analysen wurden auf den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk bezogene Annahmen und Festlegungen getroffen.

Die Generalziele Z1 "Mensch und Umwelt" und Z2 "Ressourcenschonung" wurden weiter in Hauptziele, Ziele und Unterziele unterteilt. Die Quantifizierung und Beurteilung der Generalziele Z1 und Z2 erfolgt im Rahmen der Wirksamkeitsanalyse. Zur Quantifizierung der abstrakten Ziele wurden konkrete und messbare Zielkriterien ausgewählt, die üblicherweise bei der Ökobilanzierung und sozialorientierter Betrachtungen verwendet werden, z. B. Umweltauswirkungen, Material- und Energieverbrauch und Zahl der Arbeitsunfälle. Die Beurteilung der Zielerfüllung erfolgt über die Ermittlung von Teilwirksamkeiten für jedes Szenario. Die

Teilwirksamkeiten werden anschließend für jedes Szenario zu einer Gesamtwirksamkeit zusammengeführt. Betrachtungen zum Generalziel Z4 „Wirtschaftlichkeit“ erfolgen im Zuge der Kostenanalyse, bei der die wirtschaftlichen Aufwendungen (Einnahmen und Ausgaben) ermittelt werden.

Zusätzlich zum Zielsystem werden Grundbedingungen (Beschränkungen und/oder Zielvorgaben) festgelegt, ohne deren Erfüllung die im Zielsystem gesetzten Ziele nicht erreicht werden. Alle Szenarien müssen auf ihre Kompatibilität mit den Grundbedingungen hin überprüft werden. Eine vom Generalziel Z3 „Ausreichende Materialqualität“ losgelöste Beurteilung der Generalziele Z1, Z2 und Z4 ist nicht möglich. Deshalb wurde hier die materialbezogene Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“ formuliert. Vom Konzeptnutzer können über die „Stoffliche Zusammensetzung“ hinaus weitere Grundbedingungen, z. B. ein maximales Budget und/oder eine Recyclingquote, festgelegt werden.

Nach Ermittlung der Gesamtwirksamkeit und den anfallenden Kosten für jedes Szenario sowie nach Überprüfung der Grundbedingungen wird das Gesamtwirksamkeit-Kosten-Verhältnis je Szenario errechnet. Dieses Verhältnis bildet die Grundlage für die abschließende Reihung der untersuchten Szenarien. Je größer der Verhältniswert eines Szenarios, desto höherwertiger ist dieses Szenario im Sinne der Nachhaltigkeit im Vergleich zu den anderen Szenarien einzuordnen. Das erarbeitete Konzept unterstützt somit den Entscheidungsprozess für oder gegen eine Gestaltungsvariante bei der Planung des Abbruchs und der Aufbereitung von Mauerwerk.

Beispielbetrachtungen bestätigten die Anwendbarkeit des erarbeiteten Bewertungskonzepts, obwohl es modellbedingt nur eine vereinfachte Darstellung des komplexen Untersuchungssystems und je nach Verfügbarkeit entsprechender Daten die Beurteilung nur ausgewählter Auswirkungen erlaubt. Die Beispielbetrachtungen dienen gleichzeitig als Anleitung zur Anwendung des Bewertungskonzepts.

Neben dem erarbeiteten Bewertungskonzept als Planungsinstrument bietet die vorliegende Arbeit Ansatzpunkte für weitere nachhaltigkeitsbezogene Betrachtungen zum Abbruch und zur Aufbereitung von Mauerwerk und anderen Baustoffen. So sind bei der Bearbeitung der Thematik Fragestellungen aufgetreten, die in dieser Arbeit nicht abschließend beantwortet werden konnten oder über die Zielsetzung hinausgingen. Diese offenen Fragen bedürfen weiterer Betrachtungen. Sie betreffen das Zielsystem, die Systemgrenze, die Datenverfügbarkeit und die Bereitstellung anwenderfreundlicher Analyse- und Bewertungstools.

Das Bewertungskonzept erlaubt eine nutzerspezifische Anpassung des Zielsystems auf den unteren Zielebenen. Durch weitere Forschungsarbeiten zur Quantifizierung von Nachhaltigkeitsaspekten könnten bei fachlichem Konsens neue Wirkungskategorien als Zielkriterien in Verbindung mit neuen Unterzielen in die Bewertung einfließen. Dazu gehört die „Flächeninanspruchnahme“ durch Ressourcenabbau und Deponierung, die in Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen, wie Landwirtschaft, Wohnungsbau, Infrastruktur, Forstwirtschaft und Wasser- und Naturschutzgebiete, steht. Die Erweiterung des Zielsystems könnte die Bewertung von Recyclingprodukten und -technologien insgesamt verbessern. Letztlich können gute und preislich vorteilhafte RC-Baustoffe jedoch nur auf dem Markt bestehen, wenn die Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Recyclingmaterialien weiter abgebaut werden.

Insgesamt bildet das erarbeitete Konzept einen möglichen Baustein zur Ergänzung der Gebäudezertifizierung für die Lebenszyklus-Module C und D nach DIN EN 15804 [58]. Schließlich kann es über die Bewertung der Lebensendphase vom „Bauteil“ Mauerwerk hinaus auf andere Bauteile und Baustoffe eines Gebäudes, d. h. letztlich auf Bauschutt insgesamt, übertragen werden.

Derzeit ist die Bewertung im Wesentlichen auf die Betrachtung der Bereitstellung (Abbruch und Aufbereitung) von einer Tonne Mauerwerkbruch für alternative Anwendungen ausgelegt. Der Vergleich von Primärrohstoff und Sekundärrohstoff auf Baustoffebene (z. B. Gesteinskörnung) erfolgt über ökobilanzielle Gutschriften für den ersetzten Primärrohstoff und für Energiegewinnung durch thermische Verwertung bezogen auf eine Tonne Abbruchmaterial. Zukünftig könnte die Bewertung auch auf Betrachtungen von Produkten (z. B. Beton) oder Bauteilen (z. B. Betonwand) mit und ohne Mauerwerkbruch als Sekundärrohstoff ausgeweitet werden. Auf die Definition der funktionellen Einheit ist dann besonderes Augenmerk zu legen.

Die Durchführung der einzelnen Bewertungsschritte, aber auch die Erweiterung von Zielsystem und Systemgrenzen bedürfen der Bereitstellung entsprechender Daten. Weitere Forschungsarbeiten zu Abbruch- und Aufbereitungstechnologien und alternativen Anwendungsmöglichkeiten können die vorhandene Datengrundlage vervollständigen.

Durch einen Baustoff- oder Bauwerkpass könnten Angaben über die während der Errichtungsphase (Module A4-A5) und der Nutzungsphase (Modul B1-B7) des Bauwerks verwendeten Bauprodukte dokumentiert werden. In der Entsorgungsphase (Module C1-C4) wären damit die erforderlichen Hinweise auf die stoffliche Zusammensetzung, die mögliche Schadstoffbelastung, die angemessene Aufbereitung und anschließende Anwendung des Mauerwerkbruchs bekannt. Ergänzend könnten stoffgruppenbezogene Untersuchungen von Mauerwerkbruch zur Umweltverträglichkeit durchgeführt werden. Diese Untersuchungen könnten Angaben zu mittleren Konzentrationen umweltrelevanter Parameter der einzelnen Stoffgruppen von Mauerwerkbruch und Aussagen zur Freisetzung etwaiger Schadstoffe liefern. Zu-

sätzlich wären vergleichende Bilanzierungen zum Verbleib von Fremd- und Störstoffen sowie der damit verbundenen Schadstoffe (Salze, Schwermetalle) für einzelne Abbruch- und Aufbereitungstechniken sinnvoll. Das Konzept könnte auch erst nach dem Abbruch eines Bauwerks für die Bewertung der Aufbereitung herangezogen werden. Für den Abbruch lägen dann bereits Daten für die Bewertung vor. Zusätzlich könnten durch Untersuchung des angefallenen Abbruchmaterials direkte Aussagen zur Materialqualität getroffen werden. Somit könnten über die Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“ hinaus weitere qualitätsbezogene Grundbedingungen formuliert werden.

Die Beispielbetrachtungen haben gezeigt, dass kostenseitig große Unterschiede bei den untersuchten Gestaltungsalternativen auftreten können. Dabei können trotz gewisser technischer und ökonomischer Aufwendungen die Effektivität der Fremd- und Störstoffentfrachtung und damit die baustofftechnische und ökologische Materialqualität unterschiedlich hoch ausfallen. Höhere Wirkungsgrade könnten durch ein neues, auf die Anwendung ausgerichtetes Bauen und durch die Entwicklung bzw. Einbeziehung neuer Technologien und Strategien des Abbruchs und der Aufbereitung erreicht werden.

Ebenso zweckmäßig wäre die Einbeziehung von Angebot und Nachfrage bei RC-Baustoffen in Form von Ressourcenschonungspotenzialen. Dafür müssen die zukünftig bereitstellbaren Mengen an geeigneten RC-Baustoffen dem Bedarf in verschiedenen Anwendungsbereichen und der hierbei durch den RC-Baustoff substituierbaren Menge des entsprechenden Primärbaustoffs regionalbezogen ermittelt und gegenübergestellt werden. Betrachtungen, wie von Schiller et al. [207] für den Anwendungsbereich Beton, sind auf den Straßenbau und andere Anwendungsbereiche auszuweiten.

Die Anwendung der implementierten Analyseinstrumente (z. B. Stoffflussanalyse, Ökobilanzierung, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen) ist sehr umfangreich. Zur Vereinfachung der Analysen und als Hilfsmittel für die Nutzer des Konzepts sollten anwenderfreundliche EDV-gestützte Tools entwickelt werden. Dabei sollten Szenarien für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk mit Blick auf die spätere Anwendung des Mauerwerkbruchs baukastenartig zusammengestellt und für alle Bewertungsdimensionen analysiert werden können. Beispiele dafür finden sich bei Benedict & Hecke [15], LUBW [161] und Herbst et al. [126]. Gleichzeitig könnte die Entscheidung für oder gegen den Einsatz des Konzepts bei der Planung von Abbruchprojekten in Abhängigkeit vom Mindest-Brutto-Rauminhalt des Abbruchobjektes erfolgen.

Letztlich liegt als Ergebnis dieser Arbeit ein Konzept vor, das trotz methodischer Grenzen und offener Fragestellungen eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk bei der Planung von Abbruchprojekten erlaubt. Zukünftigen Nutzern, wie Abbruch- und Recyclingunternehmen, Behörden sowie Forschungsein-

richtungen, wird damit eine strukturierte und methodische Bewertungsgrundlage als Planungsinstrument an die Hand gegeben. Gleichzeitig werden die Nutzer für bestehende Gestaltungsvarianten für den Abbruch und die Aufbereitung von Mauerwerk sowie für die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten für Mauerwerkbruch sensibilisiert.

10 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Abbruchhandbuch. Atlas Copco MCT AB (Hrsg.), Nacka, 1985
- [2] Abfallentsorgung 2010. Fachserie 19 Reihe 1, Umwelt, Statistisches amt Hrsg.), Wiesbaden 2012
- [3] Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL): Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle (2008/98/EG).
- [4] Achternbosch, M.; Bräutigam, K. R.: Stoffstromanalysen. Einführung in den Schwerpunkt. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis, 1/2002, S. 7-9
- [5] Alandjiyska, M.; Edelmann, F. T.; Mörl, L.: Porenbetonadsorbentien zur Abwasserreinigung. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2004
- [6] Albrecht, R.: Moderner Abbruch. Bauverlag, Berlin/Wiesbaden, 1981
- [7] Andel, N.: Nutzen-Kosten-Analysen. In: Neumark, F. (Hrsg.): Handbuch der Finanzwissenschaft. Mohr, 1977, Tübingen, S. 475-518
- [8] Arendt, M.: Kreislaufwirtschaft im Baubereich: Steuerung zukünftiger Stoffströme am Beispiel von Gips. Dissertation, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät. Heidelberg, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2001
- [9] Bäätjer, K.: Ziegeleierzeugnisse mit einem Gehalt an Hafenton. German Patent DE4102159A1, Patentblatt 30.07.1992
- [10] Baukostentreiber Abfallentsorgung, Entwicklung der Aufwendungen bei Baumaßnahmen. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V./Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V. (Hrsg.), Berlin, Juni 2015
- [11] Baum, H.; Esser, K.; Höhnschied, K.J.: Volkswirtschaftliche Kosten und Nutzen des Verkehrs. Kirschbaum Verlag, Bonn, 1998
- [12] Baunetz Wissen, Das Online-Fachlexikon. www.baunetzwissen.de (Stand: Januar 2015)
- [13] Baustoffrecycling Bayern e.V., München: www.baustoffrecycling-bayern.de (Stand: Januar 2015)
- [14] Beck, T.M.: EDV-gestützte Planungssysteme zur optimalen Belegung von Fertigungslinien. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1990
- [15] Benedict, C.; Hecke, A.: Schlussbericht zum Verbundprojekt Refina - kleine und mittlere Unternehmen entwickeln kleine und mittlere Flächen (KMUEKMF); Teilvorhaben 5: Sanierungs- und rückbauorientierte Gebäudeaufnahme. Forschungsvorhaben 0330748C. Hochschule Biberach, 2009
- [16] Benoit, C.; Mazijn, B. (Hrsg.): Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. United Nations Environmental Programme (UNEP). Nairobi (Kenia), 2009
- [17] Bilitewski, B.; Gewiese, A.; Härdtle, G.: Vermeidung und Verwertung von Reststoffen in der Bauwirtschaft. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1995
- [18] Bilitewski, B.; Härdtle, G.; Marek, K.: Abfallwirtschaft. Springer-Verlag, Berlin, 1994
- [19] Bohlinger, M.R.: Grundlagen, Methodik und Verfahren der Verkehrsmanagementplanung. Dissertation, TU Darmstadt, Darmstadt, 2006
- [20] Böhm, E.; Hillenbrand, T.; Liebert, J. et al.: Kosten-Wirksamkeitsanalyse von nachhaltigen Maßnahmen im Gewässerschutz. UBA-Texte, 12/02, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt, Berlin, 2002
- [21] Böhringer, P.; Höffl, K.: Baustoffe wiederaufbereiten und verwerten. AVS – Institut GmbH – Verlag, Unterhaching, 1996

- [22] Brameshuber, W.; Koster, M.; Graubohm, M.; Saenger, D.: Entwicklungsfähigkeit von Mauerwerk aus baustofflicher Sicht. Mauerwerk, 15/2011, S. 273-280
- [23] Brunner, P.H.; Döberl, G.; Eder, M.; Frühwirth, W.; Huber, R.; Hutterer, H.; Pierrard, R.; Schönback, W.; Wöginger, H.: Bewertung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen mit dem Ziel der nachsorgefreien Deponie – BEWEND. Umweltbundesamt Monographien, Band 149, Wien, Österreich, 2001
- [24] Budelmann, H.; Dora, B.: Beton im Stoffkreislauf. ARCONIS 4, 1999, Nr. 1, S. 10-13
- [25] Bundesministerium für Arbeit und Soziales: Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS), Arbeitsplatzgrenzwerte, TRGS 900 2006. Bundesarbeitsblatt BArbBl. 2006, Nr. 1, S. 41 (zuletzt geändert: Gemeinsames Ministerialblatt GMBL. 2012, Heft 1, S. 11)
- [26] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Berlin, September 2014
- [27] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen, Kriteriensteckbrief 42 - Rückbaubarkeit, Recyclingfreundlichkeit.
http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/zertifizierung/42_rueckbaubarkeit.pdf (Stand: Januar 2015)
- [28] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin: Ökobau.dat. <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/oekobaudat.html> (Stand: Januar 2015)
- [29] Büttner, P: Abbruch von Stahlbeton- und Mauerwerksbauten - Entwicklung einer Entscheidungshilfe zur Auswahl von Hydraulikbaggern. Dissertation TU-Darmstadt zum Thema, Cuvillier Verlag Göttingen, Darmstadt, 2002
- [30] Cansier, D.: Umweltökonomie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, 1993
- [31] Cerwenka, P.: Ein Verfahren zur Beurteilung von Rangstabilitäten in der Nutzwertanalyse. Zeitschrift für Verkehrswissenschaft 1/1982, S. 29-43
- [32] Clement, D.; Hammer, K.; Brunner, P. H.: Bewertung unterschiedlicher Szenarien der Behandlung von Baurestmassen anhand von Kosten-Wirksamkeits-Analysen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 11-12/2011, S.211-223
- [33] Clement, D.; Hammer, K.; Brunner, P. H.: Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling der EU, ACTION 6, Evaluierung des Stands der Technik und mittelfristiger Entwicklungsmöglichkeiten von selektivem Rückbau und Baurestmassenaufbereitung, Endbericht. TU Wien, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Forschungsbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement, Wien, September 2010
- [34] Clement, D.; Hammer, K.; Brunner, P. H.: Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling der EU, ACTION 8, Entwicklung und Berechnung von Szenarien zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen, Endbericht. TU Wien, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Forschungsbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement, Wien, Oktober 2011
- [35] Clement, D.; Hammer, K.; Brunner, P. H.: Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling der EU, ACTION 7.1, Implementierung der „Thematischen Strategie für Abfallvermeidung und –Recycling“ für Baurestmassen. 1. Kriterien für Sekundärprodukte und Behandlungsverfahren, Endbericht. TU Wien, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Forschungsbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement, Wien, Juni 2011

- [36] DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620. Beuth-Verlag, Berlin, September 2010
- [37] Das Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen, Aufbau – Anwendung – Kriterien. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V. (Hrsg.), Stuttgart, 2009
- [38] Dehler, M.: Optische Sortierung von mineralischen Rohstoffen. Die Naturstein-Industrie, 6/2004, S. 14-36
- [39] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V., (DGfM): Jahresbericht 2006. Berlin, 2007
- [40] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V., (DGfM): Jahresbericht 2009/2010. Berlin, 2011
- [41] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau e.V. (DGfM), Berlin: mauerwerkbau-lehre.de (Stand: Januar 2015)
- [42] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser, Teile I und III, Mai 2009 und Teil II, Berlin, September 2011
- [43] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten in Innenräumen, Oktober 2010, Berlin
- [44] DIN 105-100: Mauerziegel - Teil 100: Mauerziegel mit besonderen Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin, Januar 2012
- [45] DIN 105-5: Mauerziegel - Teil 5: Leichtlanglochziegel und Leichtlanglochziegelplatten. Beuth-Verlag, Berlin, Juni 2013
- [46] DIN 105-6: Mauerziegel - Teil 6: Planziegel. Beuth Verlag, Berlin, Juni 2013
- [47] DIN 18007: Abbrucharbeiten - Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche. Beuth Verlag, Mai 2000
- [48] DIN 18035-5: Sportplätze - Teil 5: Tennenflächen. Beuth Verlag, Berlin, August 2007
- [49] DIN 18148: Hohlwandplatten aus Leichtbeton. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2000
- [50] DIN 18459: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Abbruch- und Rückbauarbeiten. Beuth Verlag, Berlin, September 2012
- [51] DIN 18550-1 (Norm-Entwurf): Putz und Putzsysteme – Ausführung. Beuth Verlag, Berlin, August 2013
- [52] DIN 23006-2: Steinkohlenaufbereitung - Beurteilung von Aufbereitungseinrichtungen und -verfahren - Teil 2: Klassierung. Beuth-Verlag, Berlin, Januar 2005
- [53] DIN 277-1: Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau - Teil 1: Begriffe, Ermittlungsgrundlagen. Beuth-Verlag, Berlin, Februar 2005
- [54] DIN 4166: Porenbeton-Bauplatten und Porenbeton-Planbauplatten. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 1997
- [55] DIN 4226-100: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen, Beuth Verlag, Berlin, Februar 2002
- [56] DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2013
- [57] DIN EN 13279-1: Gipsbinder und Gips-Trockenmörtel - Teil 1: Begriffe und Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin, November 2008
- [58] DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Beuth Verlag, Berlin, April 2012

- [59] DIN EN 1996: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten. Beuth-Verlag, Berlin
- [60] DIN EN 771-1: Festlegungen für Mauersteine - Teil 1: Mauerziegel. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2011
- [61] DIN EN 771-2: Festlegungen für Mauersteine - Teil 2: Kalksandsteine. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2011
- [62] DIN EN 771-3: Festlegungen für Mauersteine - Teil 3: Mauersteine aus Beton (mit dichten und porigen Zuschlägen). Beuth Verlag, Berlin, Juli 2011
- [63] DIN EN 771-4: Festlegungen für Mauersteine - Teil 4: Porenbetonsteine. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2011
- [64] DIN EN 771-5: Festlegungen für Mauersteine - Teil 5: Betonwerksteine. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2011
- [65] DIN EN 998-1: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 1: Putzmörtel. Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2010
- [66] DIN EN 998-2: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 2: Mauermörtel, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2010
- [67] DIN EN ISO 14020: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Allgemeine Grundsätze (ISO 14020:2000). Beuth Verlag, Berlin, Februar 2002
- [68] DIN EN ISO 14021: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung Typ II) (ISO 14021:1999 + Amd 1:2011). Beuth Verlag, Berlin, April 2012
- [69] DIN EN ISO 14024: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen (Umweltkennzeichnung Typ I) - Grundsätze und Verfahren (ISO 14024:1999). Beuth Verlag, Berlin, Februar 2001
- [70] DIN EN ISO 14025: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006). Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2011
- [71] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006). Beuth Verlag, Berlin, November 2009
- [72] DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006). Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2006
- [73] DIN EN ISO 14045: Umweltmanagement - Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen - Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2012
- [74] DIN V 106: Kalksandsteine mit besonderen Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2005
- [75] DIN V 18151-100: Hohlblöcke aus Leichtbeton - Teil 100: Hohlblöcke mit besonderen Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2005
- [76] DIN V 18152-100: Vollsteine und Vollblöcke aus Leichtbeton - Teil 100: Vollsteine und Vollblöcke mit besonderen Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2005
- [77] DIN V 18153-100: Mauersteine aus Beton (Normalbeton) - Teil 100: Mauersteine mit besonderen Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2005
- [78] DIN V 18550: Putz und Putzsysteme – Ausführung. Beuth Verlag, Berlin, April 2005
- [79] DIN V 18580: Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin, März 2007
- [80] DIN V 4165-100: Porenbetonsteine - Teil 100: Plansteine und Planelemente mit besonderen Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2010

- [81] DIN 24100-1: Bau- und Baustoffmaschinen; Mechanische Zerkleinerung, Verfahrenstechnische Begriffe. Beuth-Verlag, Berlin, Mai 1978
- [82] DIN 24100-2: Bau- und Baustoffmaschinen; Mechanische Zerkleinerung; Maschinenbegriffe, Größenangaben. Beuth-Verlag, Berlin, August 1983
- [83] Drees, G.: Recycling von Baustoffen im Hochbau. Wiesbaden, Bauverlag, 1989
- [84] Eden, W.: Gesamtkonzept: Stoffkreislauf im Mauerwerksbau. Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover, 2009
- [85] Eden, W.: Herstellung von Kalksandsteinen aus Bruchmaterial von Kalksandsteinmauerwerk mit anhaftenden Resten von Dämmstoffen sowie weiterer Baureststoffe. Forschungsbericht - Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Nr. 86, Selbstverlag, Hannover, 1997
- [86] Eden, W.: Recycling-Möglichkeiten für Kalksandsteine. Recycling '10, Bauhaus-Universität Weimar, 2010
- [87] Eden, W.; Flassenberg, G.: Kalksandstein-Recycling-Material für den Deponiebau - Methanox II (AiF). In: Eis, A.; Ortlepp, S.: Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau. Jäger, W. (Hrsg.): Mauerwerk-Kalender 2013 - Bauen im Bestand. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2013, S. 653-654
- [88] Eden, W.; Flottmann, N.; Kohler, G. et al.: Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel. Straße + Autobahn 8/2011, S. 569-571
- [89] Eden, W.; Middendorf, B.: Entwicklung eines Recycling-Mauersteins - Verwendung von Abbruchmaterial und Baurestmassen und Anwendung der Kalksandstein-Technologie. Mauerwerk 1/2009, S. 46-49
- [90] Eden, W.; Middendorf, B.: Schlussbericht - Entwicklung eines Recycling-Mauersteins unter Verwendung von Abbruchmaterial und Baurestmassen und Anwendung der Kalksandstein-Technologie. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2009
- [91] Eden, W.; Niebuhr, B.: Kalksandstein-Recycling. 2005
- [92] Eibl, J.; Walther, H.-J.: Umweltgerechter Rückbau. In: Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Baustoffe. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Heft 462, Beuth Verlag, Berlin, 1996, S. 9-92
- [93] Ekkerlein, C.: Ökologische Bilanzierung von Gebäuden in frühen Planungsphasen auf Basis der Produktmodellierung. Dissertation, TU München, München 2004
- [94] Endres, A.; Staiger, B.: Nutzen-Kosten-Analyse der Umweltpolitik. In: Junkernheinrich, M.; Klemmer, P.; Wagner, G.R. (Hrsg.): Handbuch zur Umweltökonomie. Analytica Verlag, Berlin, 1995, S. 128-133
- [95] Escher, M.: Untersuchungen zur Sortierbarkeit von heterogenen Abbruchgemischen mittels Nahinfrarot-Technik. Diplomarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 2010
- [96] EU-Bauproduktenverordnung: Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates. EU-Amtsblatt L 88/5, 04.04.2011
- [97] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps. First edition March 2010. EUR 24378 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010

- [98] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010
- [99] Eyerer P. (Hrsg.): Ganzheitliche Bilanzierung – Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Springer Verlag , Heidelberg, 1996
- [100] Eyerer, P.; Reinhardt, H.W. (Hrsg.): Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden, Wege zu einer ganzheitlichen Betrachtung. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, 2000
- [101] Flick, G.; Niedersen, K.-U.; Memmler, H.-J.: Das Wachstum von Weizen, Raps- und Kopfsalatwurzeln als Qualitätskriterium für die Beurteilung von Porenbetonbruch-Kultursubstraten. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, VDLUFA-Schriftenreihe Bd. 60/2005, S. 142-148
- [102] FLL-Richtlinien. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), Bonn, 2013
- [103] Gallenkemper, B.: Schlussbericht: Ökologischer Nutzen des Recyclings und der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. (RWB), Institut für Abfall- und Abwasserwirtschaft e. V. (Hrsg.), 2003
- [104] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). 2012
- [105] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG). 1994
- [106] Gewiese, A.; Gladitz-Funk, I.; Schenk, B.: Recycling von Baureststoffen.: expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994
- [107] Glitza, H. ; Morgenroth, H. ; Kwasny-Echterhagen, R. ; Koslowski, Th.: Mauersteine in Plansteinqualität auf Basis von Ziegelsplitt und Braunkohlenasche. 13. Internationale Baustofftagung, - ibausil -, 24. - 26. September 1997 in Weimar, S. 2.1013-2.1020
- [108] Goldmann, D.: Erschließung neuer Rohstoffpotenziale aus Abfallströmen durch Entwicklung vernetzter Verwertungsstrukturen und mehrstufiger Aufbereitungsprozesse, Recycling und Rohstoffe, Band 2, Hrsg. K.-J. Thomé-Kozmiensky, D. Goldmann, TK-Verlag, S. 251-268
- [109] Goßen, T.; Kurkowski, H.: Der Einsatz von Recycling-Baustoffen im GaLaBau: Aktuelle Entwicklungen. Neue Landschaft, 12/2013, S. 23-31
- [110] Grahlert, H.; Herzberg, H.; Stork, B.; Klose, W.: Bodenartiger Wertstoff, Verfahren zu seiner Herstellung und Verwendung des bodenartigen Wertstoffes. German Patent DE102008048154, Patentblatt 01.04.2010
- [111] Graubner, C.-A.; Hüske, K.: Nachhaltigkeit im Bauwesen, Grundlagen - Instrumente - Beispiele. Ernst & Sohn, Berlin, 2003
- [112] Graubner, C.-A.; Pohl, S.: Deutschland baut darauf – Nachhaltigkeit von Ein- und Zweifamilienhäusern aus Mauerwerk. Mauerwerk, 12/2013, S. 344-356
- [113] Graubner, C.-A.; Pohl, S.: Nachhaltigkeit von Ein- und Zweifamilienhäusern aus Mauerwerk. Mauerwerk. Studie, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Massivbau, Darmstadt, April 2013
- [114] Graubner, C.-A; Herzig, K.; Hock, C.: Ökologische und ökonomische Potentiale von Mauerwerk. Mauerwerk, 9/2005, S. 179-188

- [115] Grimble, R.; Wellard, K.: Stakeholder Methodologies in Natural Resource Management: A Review of Principles, Contexts, Experiences and Opportunities. *Agricultural Systems*, 2/1997, S. 173-193
- [116] Guinée, J.B.; Huppes, G.; Heijungs, R.: Developing an LCA guide for decision support. *Environmental Management and Health*, 3/2001, S. 301-311
- [117] Hanisch, J.: Aktueller Stand der Bauabfallsortierung. *Aufbereitungs-Technik*, 10/1998, S. 485-492
- [118] Hanusch, H.; Kuhn, T.; Canter, U.: *Nutzen-Kosten-Analyse*. Verlag Vahlen, München, 1994
- [119] Heer, B.; Schubert, P.: Umweltverträglichkeit und Wiederverwertbarkeit von Mauerwerkbaustoffen. *Mauerwerk-Kalender 1999*, Ernst & Sohn, Berlin, 1999, S. 757-776
- [120] Heidger, C.; Kurkowski, H.: Tragschichten mit vegetationstechnischen Eigenschaften. Begriffsdefinition, Bauweisen und technische Voraussetzungen. *BR Baustoff Recycling + Deponietechnik*, 8/2003, S. 38-42
- [121] Heijungs, R.; Guinée, J.B.; Huppes, G.; Lankreijer, R.M.; Udo de Haes, H.A.; Wegener Sleeswijk, A.; Ansems, A.M.M.; Eggels, P.G.; van Duin, R.; de Goede, H.P.: Environmental life cycle assessment of products. I: Guide - October 1992. II: Backgrounds - October 1992. CML (NOH report 9266 + 9267), Leiden, 1992
- [122] Herbst, T.; Meng, B.: Concept for a holistic sustainability assessment of the end-of-life phase of masonry. In: Přikryl, R.; Török, Á.; Gómez-Heras, M.; Miskovsky, K. & Theodoridou, M. (eds) *Sustainable Use of Traditional Geomaterials in Construction Practice*. Geological Society, London, Special Publications, 416. (First published online 2015, in press)
- [123] Herbst, T.; Meng, B.: SIM Stoffkreislauf im Mauerwerksbau - Ganzheitliche Eignungsbewertung potenzieller Recyclingwege für Mauerwerksrestmassen. In: Eis, A.; Ortlepp, S.: Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau. Jäger, W. (Hrsg.): *Mauerwerk-Kalender 2013 - Bauen im Bestand*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2013, S. 637-640
- [124] Herbst, T.; Rübner, K.; Meng, B.: Ganzheitliche Eignungsbewertung von Sekundärrohstoffen für den Einsatz in Beton. *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (2012), Heft 8, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 533-539
- [125] Herbst, T.; Rübner, K.; Meng, B.: Ganzheitliche Eignungsbewertung potenzieller Recyclingbereiche für Mauerwerksbruch. In: Teipel, U., Schmidt, R. (Hrsg.): *Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen*, Band 2. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2011, S. 153-165
- [126] Herbst, T.; Rübner, K.; Schneider, S.; Beck, T.: Schlussbericht Vorhaben 17022 N: Stoffkreislauf im Mauerwerksbau - Nachhaltigkeitsanalyse für das Mauerwerksrecycling. Forschungsvereinigung Porenbeton e.V., Berlin, 2013
- [127] Hesse, H.: Die Kostenwirksamkeitsanalyse. *Verwaltung und Fortbildung*, 3/1975, S. 79-90
- [128] Hlawatsch, F.; Kropp, J.: *Leichte Wandbausteine aus Porenbetonbrechsanden*. MPA Bremen
- [129] Hoffmeister, W.: *Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse*. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2000
- [130] Huffman, K.; Faist, R.: Der Markt für Sekundärrohstoffe. Teil 2: Baureststoffe. Oberhausen: Informationsbüro Kreislaufwirtschaft. *Berichte zur Kreislaufwirtschaft* 3/1995
- [131] Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin: EPDs nach Kategorien, Mauerwerk. <http://bau-umwelt.de/hp547/Mauerwerk.htm> (Stand: Januar 2015)

- [132] Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin: Wozu Umwelt-Produktdeklarationen? (EPDs). <http://bau-umwelt.de/hp6239/Wozu-EPDs.htm> (Stand: Januar 2015)
- [133] Jäger, T.; Karger, C.R.: Instrumente zur Nachhaltigkeitsbewertung, Eine Synopse. Programmgruppe Mensch, Umwelt, Technik, Forschungszentrum Jülich, 2006
- [134] Jung, W.: Rückbauleitfaden. Staatliches Umweltamt Hagen (Hrsg.), 2005
- [135] Kalkmörtel nach historischem Vorbild. Aufgaben und Lösungen in der Baudenkmalpflege. Remmers Fachplanung, 2006, S. 25-28
- [136] Ketelhut, R.: Sortieranaysen zur Qualitätssicherung von RC-Baustoffen. Eine Untersuchung im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. stoffstromdesign, Neumünster, 2008
- [137] Kistner, K.-P.; Steven, M.: Produktionsplanung. Heidelberg, 1990
- [138] Kleemann, F.; Aschenbrenner, P.; Lederer, J.: Methode zur Bestimmung der Materialzusammensetzung von Gebäuden vor dem Abbruch. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 2015, S. 21-27
- [139] Klenner, R.: Unterstützung stoff- und energieflussinduzierter Entscheidungen durch Betriebliche Umweltinformationssysteme. Dissertation, Aachen, Shaker Verlag, 2002
- [140] Kloft, H.: Kreislaufgerechtes Bauen. Der Architekt, 1998, Nr. 8, S. 469-475
- [141] Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA) – Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2009
- [142] Klose, B.: Selektiver Rückbau. Bauschuttrecycling und Deponietechnik, 3/1996, S. 12-15
- [143] Knöfel, D.: Zuschläge und Zusatzstoffe in historischen Mörteln. Bautenschutz Bausanierung, 1988
- [144] Koch, E.; Scheider, U. (Hrsg.): Flächenrecycling durch kontrollierten Rückbau. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997
- [145] Kohler, G.: Recyclingpraxis Baustoffe. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1997
- [146] Korth, D.: Abbruch oder Rückbau? Baustoffrecycling und Deponietechnik, 5/1996, S. 22-23
- [147] Korth, D.; Lippok, J.: Abbrucharbeiten – Vorbereitung und Durchführung. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1987
- [148] Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2008. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2008. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (Hrsg.), Berlin 2011
- [149] Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2012. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (Hrsg.), Berlin 2015
- [150] Krey, F.: Selektiver Abbruch – Beispiele aus der Praxis. Gut erhalten – Die Nutzung gebrauchter Bauteile bei Neubau und Sanierung. SBB – Sonderabfallgesellschaft Berlin Brandenburg GmbH, 2008
- [151] Kugler, G.: Betriebswirtschaftslehre der Unternehmung. Fachbuchreihe für wirtschaftliche Bildung, Vol. 11, Europa-Lehrmittel Verlag, Haan-Gruiten, 1990
- [152] Kuhnhenne, M.; Döring, B.; Kocker, R.; Pyschny, D.; Feldmann, M.: Die Ökobilanz als Baustein der Nachhaltigkeitsbewertung im Industrie- und Gewerbebau. Stahlbau, 6/2010, S. 439-447

- [153] Kümmel, J.: Ökobilanzierung von Baustoffen am Beispiel des Recyclings von Konstruktionsleichtbeton. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, 2000
- [154] Künne, H. D.; Steierwald, G.; Vogt, W. (Hrsg.): Stadtverkehrsplanung – Grundlagen, Methoden, Ziele. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005
- [155] Kurkowski, H.: Einsatz von Recycling-Baustoffen im Garten- und Landschaftsbau. Recycling '05, Bauhaus-Universität Weimar, 2005
- [156] LAGA-Mitteilung M 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, November 1997
- [157] LAGA-Mitteilung M 20, Eckpunkte (EP) der LAGA für eine „Verordnung über die Verwertung von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken“. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, August 2004
- [158] Lander, S.; Lindner, K.; Weiß, U.: Abschlussbericht zum Förderprojekt: Entwicklung und Bewertung von Aufbereitungstechnologien als Voraussetzung für das stoffspezifische Recycling von Hochbauabfällen AZ 18857. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 2002
- [159] Landmann, M.; Seifert, G.: Schlussbericht IGF-Vorhaben 16617 BG: Aufschlussverfahren zur Trennung von Verbundkonstruktionen im Mauerwerksbau. Forschungvereinigung der Leichtbetonindustrie e. V., Neuwied, 2012
- [160] Lippok, J.; Korth, D.: Abbrucharbeiten. Grundlagen, Vorbereitung, Durchführung. Deutscher Abbruchverband e.V. (Hrsg.), Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Köln, 2007
- [161] LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.): Kostenermittlung für Rückbau- und Abbrucharbeiten. EDV-Programm, Karlsruhe, 2001-2007:
http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/216660/AbbruchToolinEuro070516_2.xls?command=downloadContent&filename=AbbruchToolinEuro070516_2.xls
- [162] Marek, K.A.; Baron, M.: Kostenfalle Rückbau, Teilentkernung oder Abbruch, Teil 1. Baustoff Recycling und Deponietechnik BR, 10/1997, S. 10-14
- [163] Marek, K.A.; Baron, M.: Kostenfalle Rückbau, Teilentkernung oder Abbruch, Teil 2. Baustoff Recycling und Deponietechnik BR, 11/12/1997, S. 8-11
- [164] Matthies, M. (Hrsg.): Stoffstromanalyse und Bewertung. Beiträge des Instituts für Umweltsystemforschung, Bd. 3, Institut für Umweltsystemforschung, Universität Osnabrück, Osnabrück, 1997
- [165] Mercardo Valdivia, S.: Ökonomische Substitutionspotentiale für natürliche Rohstoffe durch Sekundärstoffe dargestellt am Beispiel der Entwicklung regionaler Konzepte zum Bauschuttrecycling. Dissertation, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe (TH), 1995
- [166] Möller, A.: Grundlagen stoffstrombasierter Betrieblicher Umweltinformationssysteme. Dissertation. Projekt Verlag, Bochum, 2000
- [167] Mötzl, H.: Haus der Zukunft, Entsorgungswege der Baustoffe. IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie, 2009
- [168] Mühlenkamp, H.: Kosten-Nutzen-Analyse. Oldenbourg Verlag, 1994, München
- [169] Müller, A.: Baustoffrecycling. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 11-12/2011, S. 224-230
- [170] Müller, A.: belTerra® – Chronologie der Entwicklung eines Recyclingproduktes. Bauhaus-Universität Weimar, 2009

- [171] Müller, A.: Recycling von Mauerwerkbruch - Stand und neue Verwertungswege (Teil 2). *zi Ziegelindustrie International - Brick and Tile Industry International*, 7/2003, S. 42-46
- [172] Müller, A.: Recycling von Mauerwerkbruch – Stand und neue Verwertungswege (Teil 1). *zi Ziegelindustrie International - Brick and Tile Industry International*, 6/2003, S. 17-25
- [173] Müller, A.: Rohstoffe und Technologien für das Baustoffrecycling. *Recycling und Rohstoffe - Band 4*. Karl J. Thomé-Kozmiensky, K. J., Goldmann, D. (Hrsg.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2011
- [174] Müller, A.: Stoffkreisläufe für Mauerwerksabbruch? 13. Internationale Baustofftagung, - ibausil -, 24. - 26. September 1997 in Weimar, S. 2-1001 - 2-1011
- [175] Müller, A.: Verwertung von Recyclingbaustoffen aus Mauerwerkbruch – Eigene Entwicklungen (Teil 3). *zi Ziegelindustrie International - Brick and Tile Industry International*, 10/2003, S. 2-10
- [176] Müller, A.; Landmann, M.; Palzer, U.: Rückgewinnung sortenreiner Baustofffraktionen aus Mauerwerk. *Mauerwerk*, 12/2013, S. 357-364
- [177] Müller, A.; Schnell, A.; Rübner, K.: Aufbaukörnungen aus Mauerwerkbruch. *Chemie Ingenieur Technik*, 2012, Nr. 10, S. 1780-1791
- [178] Müller, A.; Schnell, A.; Rübner, K.: Die Herstellung von Leichtgranulaten aus Mauerwerkbruch. *Mauerwerk* 17 (2013), Heft 6, S. 365-371
- [179] Müller, C.: Anforderungen an Werkstoffe für kreislaufgerechtes Bauen. Vortragsskript, 20. Aachener Baustofftag, Aachen, 3. März 1998
- [180] Nachhaltig Bauen mit Porenbeton. Bundesverband Porenbeton, 2003
- [181] Natürliche Gesteinskörnungen. WECOBIS, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Bayerische Architektenkammer (ByAK), 2014
- [182] Nickel, W.: *Recycling - Handbuch*. Düsseldorf, VDI Verlag GmbH, 1996
- [183] Nicolai, M.: Zur Konfiguration von verfahrenstechnischen Anlagen für das wirtschaftliche Recycling von Bauschutt. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1994
- [184] Niedersen, K.-U.; Flick, G.; Memmler, H.-J.: Porenbetonbruch als Bodenverbesserer im Landbau. *Müll und Abfall*, 5/2004, S. 231-234
- [185] OENORM S 2096-1: Stoffflussanalyse - Teil 1: Anwendung in der Abfallwirtschaft – Begriffe. Beuth-Verlag, Berlin, 1. Januar 2005
- [186] OENORM S 2096-2: Stoffflussanalyse - Teil 2: Anwendung in der Abfallwirtschaft – Methodik. Beuth-Verlag, Berlin, 1. Januar 2005
- [187] Olschewski, R.: Nutzen-Kosten-Analyse des Wasserschutzes durch eine Aufforstung. Dissertation, Sauerländer's Verlag, Frankfurt a.M., 1997
- [188] Ortmann, M.; Frühwirth, W.; Döberl, G.: Modifizierte Kosten-Wirksamkeits-Analyse in der Altlastensanierung, *Handbuch zur Anwendung im Rahmen von Variantenstudien*. Umweltbundesamt GmbH, Kommunalkredit Public Consulting GmbH, denkstatt GmbH, Wien, 2011
- [189] Osebold, R.: *Abbruch von Massivbauwerken*. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln 1981
- [190] PE INTERNATIONAL AG, Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart: GaBi 4. Software und Datenbanken zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart, Echterdingen: LBP, PE 1992-2011

- [191] Pfeifer, G.; Ramcke, R.; Achtziger, J.; Zilch, K.: Mauerwerk Atlas. Birkhäuser – Verlag für Architektur, Basel, 2001
- [192] Porenbeton. Ecobine -Informationsnetz im Ökologischen Bauen, Bauhaus-Universität Weimar
- [193] Position // August 2015, Nachhaltigkeitsaspekte in den Bauordnungen der Länder – Empfehlung der Kommission Nachhaltiges Bauen beim Umweltbundesamt Kommission (KNBau) an die ARGEBAU zur Überarbeitung der Musterbauordnung. Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt (Hrsg.), Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, August 2015
- [194] RAL-GZ 250. Substrate für Pflanzen - Gütesicherung. Beuth Verlag, Berlin, 2012
- [195] Reinhold, M.; Knopf, U.; Müller, A.; Schwieger, B.: Poröse Granulate aus Abfallstoffen. German Patent DE10354711A1, Patentblatt 08.07.2004
- [196] Reinhold, M.; Müller, A.: Leichtgranulate aus Mauerwerkbruch. Tagung 10 Jahre UVR-FIA-GmbH, Aufbereitung und Recycling, Freiberg, 13. u. 14. November 2002
- [197] Rentz, O.; Ruch, M.; Nicolai, M.; Spengler, T.; Schultmann, F.: Selektiver Rückbau und Recycling von Gebäuden dargestellt am Beispiel des Hotel Post in Dobel. Ecomed Verlag, Landsberg, 1998
- [198] Rentz, O.; Ruch, M.; Schultmann, F.; Sindt, V.; Zundel, T.; Charlot-Valdieu, C.; Vimond, E.: Selektiver Gebäuderückbau und konventioneller Abbruch – Technisch-wirtschaftliche Analyse eines Pilotprojektes. Ecomed Verlag, Landsberg, 1998
- [199] Rentz, O.; Schultmann, F.; Ruch, M.; Sindt, V.: Demontage und Recycling von Gebäuden: Entwicklung von Demontage- und Verwertungskonzepten unter besonderer Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit. Umweltforschung in Baden-Württemberg, Ecomed Verlag, Landsberg, 1997
- [200] Rentz, O.; Seemann, A.; Raess, C.; Schultmann, F.: Entwicklung optimierter Rückbau- und Recyclingverfahren durch Kopplung von Gebäudedemontage und Bauschutttaufbereitung. Abschlussbericht gefördert unter dem Az: 14137 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2003
- [201] Roth-Kleyer, S.: Altziegel in der Dachbegrünung, Renaissance eines wichtigen Substratausgangsstoffes. Deutsches Ingenieurblatt, 10/2013, S. 22-25
- [202] Roth-Kleyer, S.: Kennwerte übersichtlich im Tabellenformat. Substratausgangsstoffe. Dach + Grün, 1/2013, S. 12-21
- [203] Rübner, K.: Aufbaukörnungen - Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen durch die Entwicklung innovativer Technologien für die Herstellung hochwertiger Aufbaukörnungen aus sekundären Rohstoffen auf der Basis von heterogenen Bau- und Abbruchabfällen, TP: Materialcharakterisierung. Schlussbericht zum Verbundvorhaben AUFBAUKÖRNUNGEN. BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Oktober 2012
- [204] Schäfer, C.; Gamm, A.; Weiß, W.: Analytische Untersuchung von Bauschuttrecyclingmaterial auf Sulfat und PAK. Untersuchung von Stichproben bei Bauschuttrecycling-Anlagen in Baden-Württemberg. Bericht, Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, Referat 35, Kreislaufwirtschaft Abfallbehandlung, 2003
- [205] Schamotte-Ziegelmehl. Kremer Pigmente GmbH & Co. KG, Aichstetten, 2013
- [206] Scheiner, J.: Bewertungsverfahren in der Verkehrsplanung. Arbeitspapiere des Fachgebiets Verkehrswesen und Verkehrsplanung 9, Dortmund, Mai 2003
- [207] Schiller, G.; Deilmann, C.; Reichenbach, J.; Gruhler, K.; Röhm, P.; Baumann, J.; Günther, M.: Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung

- von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. Umweltbundesamt (Hrsg.), Texte 56/2010, Dessau-Roßlau, November 2010
- [208] Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.), Heft 572, Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich, 2007
 - [209] Schmidt, M.: Methodische Ansätze zur Analyse und Auswertung betrieblicher und produktbezogener Stoffsysteme. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis, 1/2002, S. 9-15
 - [210] Schmitz, M.P.: Nutzen-Kosten-Analyse Pflanzenschutz. Wissenschaftsverlag Vauk, Kiel, 2002
 - [211] Schneeweiss, C.: Planung 1: Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991
 - [212] Schnell, A.; Ludwig, H.-M.: Aufbaukörnungen - Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen durch die Entwicklung innovativer Technologien für die Herstellung hochwertiger Aufbaukörnungen aus sekundären Rohstoffen auf der Basis von heterogenen Bau- und Abbruchabfällen, TP: Gesamtprozess. Schlussbericht zum Verbundvorhaben Aufbaukörnungen, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 2012
 - [213] Schnell, A.; Müller, A.; Rübner, K.; Ludwig, H.-M.: Mineralische Bauabfälle als Rohstoff für die Herstellung leichter Gesteinskörnungen. In: Recycling und Rohstoffe Band 5, TK Verlag, Neuruppin, 2012, S. 469-494
 - [214] Schnellert, T.: belTerra Zierkies. Bauhaus-Universität Weimar, 2005
 - [215] Schnöller, J.; Hammer, K.; Clement, D.; Brunner, P. H.: Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling der EU, ACTION 2, Bestimmung von Herkunft, Zusammensetzung und des Verbleibs von Baurestmassen – Labor, Endbericht. TU Wien, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Forschungsbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement, Wien, Oktober 2010
 - [216] Schnöller, J.; Hammer, K.; Clement, D.; Brunner, P. H.: Schadstoffkatalog, Beschreibung und Zuordnung von Schadstoffen in Abbruchobjekten. TU-Wien, Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Fachbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement, Wien, 2011
 - [217] Schönback, W.; Kosz, M.; Madreiter, T.: Nationalpark Donauauen: Kosten-Nutzen-Analyse. Springer-Verlag, Wien, New York, 1997
 - [218] Schönburg, K.: Lehmbauarbeiten. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2008, S. 184 f.
 - [219] Schultmann, F.: Kreislaufführung von Baustoffen - Stoffflußbasiertes Projektmanagement für die operative Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1998
 - [220] Schultmann, F.; Rentz, O.: Stoffstrommanagement für Baureststoffe aus dem Hochbau – Methodische Planung der Auditierung, des selektiven Rückbaus und des Recyclings von Gebäuden. Müll und Abfall, 1999, Nr. 4, S. 206-217
 - [221] Schulz, W.; Schulz, E.: Zur Umweltpolitischen Relevanz von Nutzen-Kosten-Analysen in der Bundesrepublik Deutschland. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht, 14/1991, S. 299-337
 - [222] Seemann, A.: Entwicklung integrierter Rückbau- und Recyclingkonzepte für Gebäude. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2003

- [223] Seemann, A.; Rentz, O.: Szenarienbildung zur Bestimmung der günstigsten Demontagetiefe beim selektiven Rückbau am Beispiel eines Gymnasiums. Müll und Abfall, 5/2000, S. 290-296
- [224] Seemann, A.; Schultmann, F.; Rentz, O.: Trilogie im Baustoffrecycling: Kostensenkung beim Gebäuderückbau durch Kopplung von Demontage, Sortierung und Aufbereitung. tec21, 37/2002, S. 7-11
- [225] Silbe, K.: Wirtschaftlichkeit kontrollierter Rückbauarbeiten. Dissertation, TU Darmstadt, Darmstadt, 1999
- [226] Sofortmaßnahmen bei Mineralölnfällen, Liste der geprüften Ölbinder. Umweltbundesamt (Hrsg.), Berlin, 2004
- [227] Spengler, T.: Industrielle Demontage- und Recyclingkonzepte, Betriebswirtschaftliche Planungsmodelle zur ökonomisch effizienten Umsetzung abfallrechtlicher Rücknahme- und Verwertungspflichten. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1994
- [228] Spengler, T.: Industrielle Demontage- und Recyclingkonzepte, Betriebswirtschaftliche Planungsmodelle zur ökonomisch effizienten Umsetzung abfallrechtlicher Rücknahme- und Verwertungspflichten. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1994
- [229] Stark, U.; Müller, A.: Herstellung von Zierkies aus den Grobfractionen von aufbereitetem Mauerwerkbruch. Ratgeber Abbruch & Recycling 2004, S. 90-92. Stein-Verlag Baden-Baden GmbH, Iffezheim
- [230] Stark, U.; Müller, A.: Korngrößenspezifische Verwertung von Mauerwerksabbruch. Recycling '01, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 2001
- [231] Statistisches Bundesamt, Wiesbaden: <http://www.destatis.de> (Stand: Januar 2015)
- [232] Switalski, M.: Hierarchische Produktionsplanung, Heidelberg, 1989
- [233] TL BuB E-StB 09. Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus. FGSV Verlag, Köln, 2009
- [234] TL Gestein-StB 04. Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau. Ausgabe 2004, Fassung 2007, FGSV Verlag, Köln, 2008
- [235] TL SoB-StB 04. Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau. Ausgabe 2004, Fassung 2007, FGSV Verlag, Köln, 2008
- [236] Toppel, C.O.: Technische und ökonomische Bewertung verschiedener Abbruchverfahren im Industriebau. Dissertation, TU Darmstadt, Darmstadt, 2003
- [237] Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau: Verwertung von Bauabfällen. <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeId=2311> (Stand: Januar 2015)
- [238] Vasilakakis, D.: Die Herstellung und Charakterisierung von Kupfer-, Chrom- und Titanoxidkatalysatoren auf Basis Porenbeton zur katalytischen Nachverbrennung von flüchtigen organischen Stoffen. Dissertation, Universität Magdeburg, Magdeburg, 2011
- [239] VDI 2095. Emissionsminderung – Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen – Stationäre und mobile Bauschuttzubereitungsanlagen. VDI-Richtlinien, Beuth Verlag, Berlin, März 2011
- [240] VDI 2243. Recyclingorientierte Produktentwicklung. VDI-Richtlinien, Beuth Verlag, Berlin, Juli 2002
- [241] Vegetationssubstrate aus rezyklierten Gesteinskörnungen aus Mauerwerk. In: Eis, A.; Ortlepp, S.: Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im

- Mauerwerksbau. Jäger, W. (Hrsg.): Mauerwerk-Kalender 2014 - Bemessen, Bewehren, Befestigen. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 634
- [242] Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV). Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482)
- [243] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV). Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 7 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973) geändert worden ist
- [244] Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001). Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. August 2013 (BGBl. I S. 2977), die durch Artikel 4 Absatz 22 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist
- [245] Volk, J.: Porenbeton - Reststoffe als Nährstoffträger für die Entwicklung von Bodenverbesserungs- bzw. Düngemitteln (BMWi-Projekt IW081052). Institut für Lebensmittel- und Umweltforschung e.V. (ILU), Nuthetal, 2010
- [246] Wagner, S.; Harr, B.; Meyer, U.: Ökologisches Bauen mit Ziegeln. Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel e.V. (Hrsg.), Bonn, 1998
- [247] Walker, I.; Tränkler, J.: Untersuchungen zur künftigen Verwertbarkeit von Bauschutt. LWA-Materialien 7/93, Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, 1993
- [248] Weil, M.: Ressourcenschonung und Umweltentlastung bei der Betonherstellung durch Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen. Dissertation, TU Darmstadt, Darmstadt, 2003
- [249] Weimann, K.: Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinentechnik. BAM-Dissertationsreihe, Band 51, Berlin 2009
- [250] Weimann, K.; Matyschik, J.; Adam, C.; Schulz, T.; Linß, E.; Müller, A.: Optimierung des Rückbaus/Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. Umweltbundesamt (Hrsg.), Texte 05/2013, Dessau-Roßlau, Februar 2013
- [251] Wendehorst Baustoffkunde, Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz. Neroth, G.; Vollenschaar, D. (Hrsg.), Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [252] Willkomm, W.: Abbruch und Recycling. RKW-Verlag, Eschborn; Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1990
- [253] Winkler, A.: Herstellung von Baustoffen aus Baurestmassen, Erstellung eines ganzheitlichen Konzepts zur Wiederverwertung von Mauerwerksabbruch in zementgebundenen Systemen. Berichte aus dem Bauwesen, Shaker Verlag, Aachen, 2001
- [254] Wittstock, B.: Methode zur Analyse und Beurteilung des Einflusses von Bauprodukteigenschaften auf die Nachhaltigkeitsbewertung im Rahmen der Zertifizierung von Gebäuden. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2012
- [255] Wittstock, B.; Albrecht, S.; Makishi Colodel C.; Lindner, J.P.: Gebäude aus Lebenszyklusperspektive – Ökobilanzen im Bauwesen. Bauphysik, 1/2009, S. 9-17
- [256] Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Wittemannsche Buchhandlung, München, 1976
- [257] Zäpfel, G.; Gfrerer, H.: Sukzessive Produktionsplanung. WiSt, 1984, Nr. 5, S. 235-241
- [258] Zibulski, D. H.: Anlagentechnik zur Aufbereitung von Baureststoffen. Fachtagung "Baumaschinentechnik", Magdeburg, VDMA Fachverband Bau- und Baustoffmaschinen, 2004

- [259] Ziegelsand (Tennenbelag nach DIN 18035) 0/4. Recycling-Park Harz GmbH, Gesellschaft für Recycling und Entsorgung, Hedeber, 2013
- [260] ZTV E-StB 09. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. FGSV Verlag, 2009

11 Anhänge

11.1 Auszüge aus AbfRRL, KrWG und EU-BauPVO

EU-Abfallrahmenrichtlinie [3]

Kapitel 1 – Gegenstand, Anwendungsbereich und Begriffsbestimmungen

Artikel 4 – Abfallhierarchie

(1) *Folgende Abfallhierarchie liegt den Rechtsvorschriften und politischen Maßnahmen im Bereich der Abfallvermeidung und -bewirtschaftung als Prioritätenfolge zugrunde:*

- a) Vermeidung,*
- b) Vorbereitung zur Wiederverwendung,*
- c) Recycling,*
- d) sonstige Verwertung, z. B. energetische Verwertung,*
- e) Beseitigung.*

(2) *Bei Anwendung der Abfallhierarchie nach Absatz 1 treffen die Mitgliedstaaten Maßnahmen zur Förderung derjenigen Optionen, die insgesamt das beste Ergebnis unter dem Aspekt des Umweltschutzes erbringen. Dies kann erfordern, dass bestimmte Abfallströme von der Abfallhierarchie abweichen, sofern dies durch Lebenszyklusdenken hinsichtlich der gesamten Auswirkungen der Erzeugung und Bewirtschaftung dieser Abfälle gerechtfertigt ist.*

Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass die Entwicklung von Abfallrecht und Abfallpolitik vollkommen transparent durchgeführt wird, wobei die bestehenden nationalen Regeln über die Konsultation und Beteiligung der Bürger und der beteiligten Kreise beachtet werden.

Die Mitgliedstaaten berücksichtigen die allgemeinen Umweltschutzgrundsätze der Vorsorge und der Nachhaltigkeit, der technischen Durchführbarkeit und der wirtschaftlichen Vertretbarkeit, des Schutzes von Ressourcen, und die Gesamtauswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit sowie die wirtschaftlichen und sozialen Folgen gemäß den Artikeln 1 und 13.

Kreislaufwirtschaftsgesetz [104]

Teil 1 – Allgemeine Vorschriften

[...]

§ 4 Nebenprodukte

(1) *Fällt ein Stoff oder Gegenstand bei einem Herstellungsverfahren an, dessen hauptsächlicher Zweck nicht auf die Herstellung dieses Stoffes oder Gegenstandes gerichtet ist, ist er als Nebenprodukt und nicht als Abfall anzusehen, wenn*

- 1. sichergestellt ist, dass der Stoff oder Gegenstand weiter verwendet wird,*
- 2. eine weitere, über ein normales industrielles Verfahren hinausgehende Vorbehandlung hierfür nicht erforderlich ist,*
- 3. der Stoff oder Gegenstand als integraler Bestandteil eines Herstellungsprozesses erzeugt wird und*
- 4. die weitere Verwendung rechtmäßig ist; dies ist der Fall, wenn der Stoff oder Gegenstand alle für seine jeweilige Verwendung anzuwendenden Produkt-, Umwelt- und Gesundheitsschutzanforderungen erfüllt und insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt führt.*

(2) *Die Bundesregierung wird ermächtigt, nach Anhörung der beteiligten Kreise (§ 68) durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates nach Maßgabe der in Absatz 1 genannten Anforderungen Kriterien zu bestimmen, nach denen bestimmte Stoffe oder Gegenstände als Nebenprodukt anzusehen sind, und Anforderungen zum Schutz von Mensch und Umwelt festzulegen.*

§ 5 Ende der Abfalleigenschaft

- (1) *Die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes endet, wenn dieser ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass*
- 1. er üblicherweise für bestimmte Zwecke verwendet wird,*
 - 2. ein Markt für ihn oder eine Nachfrage nach ihm besteht,*
 - 3. er alle für seine jeweilige Zweckbestimmung geltenden technischen Anforderungen sowie alle Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen für Erzeugnisse erfüllt sowie*
 - 4. seine Verwendung insgesamt nicht zu schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt führt.*
- (2) *Die Bundesregierung wird ermächtigt, nach Anhörung der beteiligten Kreise (§ 68) durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates nach Maßgabe der in Absatz 1 genannten Anforderungen die Bedingungen näher zu bestimmen, unter denen für bestimmte Stoffe und Gegenstände die Abfalleigenschaft endet, und Anforderungen zum Schutz von Mensch und Umwelt, insbesondere durch Grenzwerte für Schadstoffe, festzulegen.*

Teil 2 – Grundsätze und Pflichten der Erzeuger und Besitzer von Abfällen sowie der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger

Abschnitt 1 – Grundsätze der Abfallvermeidung und Abfallbewirtschaftung

§ 6 Abfallhierarchie

- (1) *Maßnahmen der Vermeidung und der Abfallbewirtschaftung stehen in folgender Rangfolge:*
- 1. Vermeidung,*
 - 2. Vorbereitung zur Wiederverwendung,*
 - 3. Recycling,*
 - 4. sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung,*
 - 5. Beseitigung.*
- (2) *Ausgehend von der Rangfolge nach Absatz 1 soll nach Maßgabe der §§ 7 und 8 diejenige Maßnahme Vorrang haben, die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet. Für die Betrachtung der Auswirkungen auf Mensch und Umwelt nach Satz 1 ist der gesamte Lebenszyklus des Abfalls zugrunde zu legen. Hierbei sind insbesondere zu berücksichtigen*
- 1. die zu erwartenden Emissionen,*
 - 2. das Maß der Schonung der natürlichen Ressourcen,*
 - 3. die einzusetzende oder zu gewinnende Energie sowie*
 - 4. die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, in Abfällen zur Verwertung oder in daraus gewonnenen Erzeugnissen.*

Die technische Möglichkeit, die wirtschaftliche Zumutbarkeit und die sozialen Folgen der Maßnahme sind zu beachten.

Abschnitt 2 – Kreislaufwirtschaft

§ 7 Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft

- (1) *Die Pflichten zur Abfallvermeidung richten sich nach § 13 sowie den Rechtsverordnungen, die auf Grund der §§ 24 und 25 erlassen worden sind.*
- (2) *Die Erzeuger oder Besitzer von Abfällen sind zur Verwertung ihrer Abfälle verpflichtet. Die Verwertung von Abfällen hat Vorrang vor deren Beseitigung. Der Vorrang entfällt, wenn die Beseitigung der Abfälle den Schutz von Mensch und Umwelt nach Maßgabe des § 6 Absatz 2 Satz 2 und 3 am besten gewährleistet. Der Vorrang gilt nicht für Abfälle, die unmittelbar und üblicherweise durch Maßnahmen der Forschung und Entwicklung anfallen.*

- (3) Die Verwertung von Abfällen, insbesondere durch ihre Einbindung in Erzeugnisse, hat ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen. Die Verwertung erfolgt ordnungsgemäß, wenn sie im Einklang mit den Vorschriften dieses Gesetzes und anderen öffentlich-rechtlichen Vorschriften steht. Sie erfolgt schadlos, wenn nach der Beschaffenheit der Abfälle, dem Ausmaß der Verunreinigungen und der Art der Verwertung Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit nicht zu erwarten sind, insbesondere keine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf erfolgt.
- (4) Die Pflicht zur Verwertung von Abfällen ist zu erfüllen, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist, insbesondere für einen gewonnenen Stoff oder gewonnene Energie ein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann. Die Verwertung von Abfällen ist auch dann technisch möglich, wenn hierzu eine Vorbehandlung erforderlich ist. Die wirtschaftliche Zumutbarkeit ist gegeben, wenn die mit der Verwertung verbundenen Kosten nicht außer Verhältnis zu den Kosten stehen, die für eine Abfallbeseitigung zu tragen wären.

§ 8 Rangfolge und Hochwertigkeit der Verwertungsmaßnahmen

- (1) Bei der Erfüllung der Verwertungspflicht nach § 7 Absatz 2 Satz 1 hat diejenige der in § 6 Absatz 1 Nummer 2 bis 4 genannten Verwertungsmaßnahmen Vorrang, die den Schutz von Mensch und Umwelt nach der Art und Beschaffenheit des Abfalls unter Berücksichtigung der in § 6 Absatz 2 Satz 2 und 3 festgelegten Kriterien am besten gewährleistet. Zwischen mehreren gleichrangigen Verwertungsmaßnahmen besteht ein Wahlrecht des Erzeugers oder Besitzers von Abfällen. Bei der Ausgestaltung der nach Satz 1 oder 2 durchzuführenden Verwertungsmaßnahme ist eine den Schutz von Mensch und Umwelt am besten gewährleistende, hochwertige Verwertung anzustreben. § 7 Absatz 4 findet auf die Sätze 1 bis 3 entsprechende Anwendung.
- (2) Die Bundesregierung bestimmt nach Anhörung der beteiligten Kreise (§ 68) durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates für bestimmte Abfallarten auf Grund der in § 6 Absatz 2 Satz 2 und 3 festgelegten Kriterien
1. den Vorrang oder Gleichrang einer Verwertungsmaßnahme und
 2. Anforderungen an die Hochwertigkeit der Verwertung.

Durch Rechtsverordnung nach Satz 1 kann insbesondere bestimmt werden, dass die Verwertung des Abfalls entsprechend seiner Art, Beschaffenheit, Menge und Inhaltsstoffe durch mehrfache, hintereinander geschaltete stoffliche und anschließende energetische Verwertungsmaßnahmen (Kaskadennutzung) zu erfolgen hat.

- (3) Soweit der Vorrang oder Gleichrang der energetischen Verwertung nicht in einer Rechtsverordnung nach Absatz 2 festgelegt wird, ist anzunehmen, dass die energetische Verwertung einer stofflichen Verwertung nach § 6 Absatz 1 Nummer 2 und 3 gleichrangig ist, wenn der Heizwert des einzelnen Abfalls, ohne Vermischung mit anderen Stoffen, mindestens 11.000 Kilojoule pro Kilogramm beträgt. Die Bundesregierung überprüft auf der Grundlage der abfallwirtschaftlichen Entwicklung bis zum 31. Dezember 2016, ob und inwieweit der Heizwert zur effizienten und rechtssicheren Umsetzung der Abfallhierarchie des § 6 Absatz 1 noch erforderlich ist.

§ 9 Getrennthalten von Abfällen zur Verwertung, Vermischungsverbot

- (1) Soweit dies zur Erfüllung der Anforderungen nach § 7 Absatz 2 bis 4 und § 8 Absatz 1 erforderlich ist, sind Abfälle getrennt zu halten und zu behandeln.
- (2) Die Vermischung, einschließlich der Verdünnung, gefährlicher Abfälle mit anderen Kategorien von gefährlichen Abfällen oder mit anderen Abfällen, Stoffen oder Materialien ist unzulässig. Abweichend von Satz 1 ist eine Vermischung ausnahmsweise dann zulässig, wenn
1. sie in einer nach diesem Gesetz oder nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz hierfür zugelassenen Anlage erfolgt,
 2. die Anforderungen an eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung nach § 7 Absatz 3 eingehalten und schädliche Auswirkungen der Abfallbewirtschaftung auf Mensch und Umwelt durch die Vermischung nicht verstärkt werden sowie
 3. das Vermischungsverfahren dem Stand der Technik entspricht.

Soweit gefährliche Abfälle in unzulässiger Weise vermischt worden sind, sind diese zu trennen, soweit dies erforderlich ist, um eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung nach § 7 Absatz 3 sicherzustellen, und die Trennung technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist.

§ 10 Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft

- (1) Die Bundesregierung wird ermächtigt, nach Anhörung der beteiligten Kreise (§ 68) durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates, soweit es zur Erfüllung der Pflichten nach § 7 Absatz 2 bis 4, § 8 Absatz 1 und § 9, insbesondere zur Sicherung der schadlosen Verwertung, erforderlich ist,
1. die Einbindung oder den Verbleib bestimmter Abfälle in Erzeugnisse/Erzeugnissen nach Art, Beschaffenheit oder Inhaltsstoffen zu beschränken oder zu verbieten,
 2. Anforderungen an das Getrennthalten, die Zulässigkeit der Vermischung sowie die Beförderung und Lagerung von Abfällen festzulegen,
 3. Anforderungen an das Bereitstellen, Überlassen, Sammeln und Einsammeln von Abfällen durch Hol- und Bringsysteme, jeweils auch in einer Einheitlichen Wertstofftonne oder durch eine Einheitliche Wertstoffverpackung in vergleichbarer Qualität gemeinsam mit gleichartigen Erzeugnissen oder mit auf dem gleichen Wege zu verwertenden Erzeugnissen, die jeweils einer verordneten Rücknahme nach § 25 unterliegen, festzulegen,
 4. für bestimmte Abfälle, deren Verwertung auf Grund ihrer Art, Beschaffenheit oder Menge in besonderer Weise geeignet ist, Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit, vor allem der in § 15 Absatz 2 Satz 2 genannten Schutzgüter, herbeizuführen, nach Herkunftsbereich, Anfallstelle oder Ausgangsprodukt festzulegen,
 - a) dass diese nur in bestimmter Menge oder Beschaffenheit oder nur für bestimmte Zwecke in Verkehr gebracht oder verwertet werden dürfen,
 - b) dass diese mit bestimmter Beschaffenheit nicht in Verkehr gebracht werden dürfen,
 5. Anforderungen an die Verwertung von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken festzulegen.

[...]

Teil 3 – Produktverantwortung

§ 23 Produktverantwortung

- (1) Wer Erzeugnisse entwickelt, herstellt, be- oder verarbeitet oder vertreibt, trägt zur Erfüllung der Ziele der Kreislaufwirtschaft die Produktverantwortung. Erzeugnisse sind möglichst so zu gestalten, dass bei ihrer Herstellung und ihrem Gebrauch das Entstehen von Abfällen vermindert wird und sichergestellt ist, dass die nach ihrem Gebrauch entstandenen Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden.
- (2) Die Produktverantwortung umfasst insbesondere
1. die Entwicklung, die Herstellung und das Inverkehrbringen von Erzeugnissen, die mehrfach verwendbar, technisch langlebig und nach Gebrauch zur ordnungsgemäßen, schadlosen und hochwertigen Verwertung sowie zur umweltverträglichen Beseitigung geeignet sind,
 2. den vorrangigen Einsatz von verwertbaren Abfällen oder sekundären Rohstoffen bei der Herstellung von Erzeugnissen,
 3. die Kennzeichnung von schadstoffhaltigen Erzeugnissen, um sicherzustellen, dass die nach Gebrauch verbleibenden Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden,
 4. den Hinweis auf Rückgabe-, Wiederverwendungs- und Verwertungsmöglichkeiten oder -pflichten und Pfandregelungen durch Kennzeichnung der Erzeugnisse sowie 5. die Rücknahme der Erzeugnisse und der nach Gebrauch der Erzeugnisse verbleibenden Abfälle sowie deren nachfolgende umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung.
- (3) Im Rahmen der Produktverantwortung nach den Absätzen 1 und 2 sind neben der Verhältnismäßigkeit der Anforderungen entsprechend § 7 Absatz 4 die sich aus anderen Rechtsvorschriften ergebenden Regelungen zur Produktverantwortung und zum Schutz von Mensch und Umwelt sowie die Festlegungen des Gemeinschaftsrechts über den freien Warenverkehr zu berücksichtigen.
- (4) Die Bundesregierung bestimmt durch Rechtsverordnungen auf Grund der §§ 24 und 25, welche Verpflichteten die Produktverantwortung nach den Absätzen 1 und 2 wahrzunehmen haben. Sie legt zugleich fest, für welche Erzeugnisse und in welcher Art und Weise die Produktverantwortung wahrzunehmen ist.

[...]

Teil 5 – Absatzförderung und Abfallberatung

§ 45 Pflichten der öffentlichen Hand

- (1) *Die Behörden des Bundes sowie die der Aufsicht des Bundes unterstehenden juristischen Personen des öffentlichen Rechts, Sondervermögen und sonstigen Stellen sind verpflichtet, durch ihr Verhalten zur Erfüllung des Zweckes des § 1 beizutragen. Insbesondere haben sie unter Berücksichtigung der §§ 6 bis 8 bei der Gestaltung von Arbeitsabläufen, der Beschaffung oder Verwendung von Material und Gebrauchsgütern, bei Bauvorhaben und sonstigen Aufträgen zu prüfen, ob und in welchem Umfang*
- 1. Erzeugnisse eingesetzt werden können,*
 - a) die sich durch Langlebigkeit, Reparaturfreundlichkeit und Wiederverwendbarkeit oder Verwertbarkeit auszeichnen,*
 - b) die im Vergleich zu anderen Erzeugnissen zu weniger oder zu schadstoffärmeren Abfällen führen oder*
 - c) die durch Vorbereitung zur Wiederverwendung oder durch Recycling aus Abfällen hergestellt worden sind, sowie*
 - 2. die nach dem Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfälle unter besonderer Beachtung des Vorrangs der Vorbereitung zur Wiederverwendung und des Recyclings verwertet werden können.*
- (2) *Die in Absatz 1 Satz 1 genannten Stellen wirken im Rahmen ihrer Möglichkeiten darauf hin, dass die Gesellschaften des privaten Rechts, an denen sie beteiligt sind, die Verpflichtungen nach Absatz 1 beachten.*
- (3) *Die öffentliche Hand hat im Rahmen ihrer Pflichten nach den Absätzen 1 und 2 Regelungen für die Verwendung von Erzeugnissen oder Materialien sowie zum Schutz von Mensch und Umwelt nach anderen Rechtsvorschriften zu berücksichtigen.*

[...]

EU-Bauproduktenverordnung [96]

Anhang I – Grundanforderungen an Bauwerke

Bauwerke müssen als Ganzes und in ihren Teilen für deren Verwendungszweck tauglich sein, wobei insbesondere der Gesundheit und der Sicherheit der während des gesamten Lebenszyklus der Bauwerke involvierten Personen Rechnung zu tragen ist. Bauwerke müssen diese Grundanforderungen an Bauwerke bei normaler Instandhaltung über einen wirtschaftlich angemessenen Zeitraum erfüllen.

[...]

3. Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz

Das Bauwerk muss derart entworfen und ausgeführt sein, dass es während seines gesamten Lebenszyklus weder die Hygiene noch die Gesundheit und Sicherheit von Arbeitnehmern, Bewohnern oder Anwohnern gefährdet und sich über seine gesamte Lebensdauer hinweg weder bei Errichtung noch bei Nutzung oder Abriss insbesondere durch folgende Einflüsse übermäßig stark auf die Umweltqualität oder das Klima auswirkt:

- a) Freisetzung giftiger Gase;*
- b) Emission von gefährlichen Stoffen, flüchtigen organischen Verbindungen, Treibhausgasen oder gefährlichen Partikeln in die Innen- oder Außenluft;*
- c) Emission gefährlicher Strahlen;*
- d) Freisetzung gefährlicher Stoffe in Grundwasser, Meeresgewässer, Oberflächengewässer oder Boden;*
- e) Freisetzung gefährlicher Stoffe in das Trinkwasser oder von Stoffen, die sich auf andere Weise negativ auf das Trinkwasser auswirken;*
- f) unsachgemäße Ableitung von Abwasser, Emission von Abgasen oder unsachgemäße Beseitigung von festem oder flüssigem Abfall;*

g) *Feuchtigkeit in Teilen des Bauwerks und auf Oberflächen im Bauwerk.* DE 4.4.2011 Amtsblatt der Europäischen Union L 88/33

[...]

6. *Energieeinsparung und Wärmeschutz*

[...] *Das Bauwerk muss außerdem energieeffizient sein und während seines Auf- und Rückbaus möglichst wenig Energie verbrauchen.*

7. *Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen*

Das Bauwerk muss derart entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden und insbesondere Folgendes gewährleistet ist:

- a) *Das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile müssen nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können;*
- b) *das Bauwerk muss dauerhaft sein;*
- c) *für das Bauwerk müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden.*

11.2 Beispielberechnungen

11.2.1 Beschreibung des Beispielbauwerks

Als Beispielbauwerk wird ein „Massivbau 1918 bis 1948“ nach Lippok & Korth [160] herangezogen. Der gewählte Massivbau mit einem Erdgeschoss und einem nicht ausgebautem Dachgeschoss (Satteldach) ist voll unterkellert. Er besteht aus einer Grundplatte und zwei Deckenplatten aus leichtbewehrtem Beton, einem Dachstuhl aus Holz, einem Ziegeldach und gemauerten Wänden. Zur baustoffbezogenen Mengeneinschätzung des Abbruchmaterials für den gewählten Gebäudetyp enthält Tab. 11.1 entsprechende Basiswerte. Die hier angegebenen Werte beziehen sich auf den Brutto-Rauminhalt (BRI) des Gebäudes nach DIN 277-1 [53]. Bei einer Grundfläche von 108,00 m² (9,00 m x 12,00 m), einer Geschosshöhe von 2,70 m für Kellergeschoss und Erdgeschoss sowie einer anrechenbaren Dachgeschosshöhe von 1,35 m (0,5 x 2,70 m) ergibt sich ein Brutto-Rauminhalt von 729,00 m³ (2 x 2,70 m x 108,00 m² + 1,35 m x 108,00 m²).

Tab. 11.1: Baustoffbezogene Mengeneinschätzung des Abbruchmaterials für „Massivbau 1918 bis 1948“ [160]

Stoffgruppen	Mengenabschätzung	
	[t/m ³ BRI]	[t]
Beton	11,6	84,6
Ziegel	22,4	163,3
Holz	0,9	6,6
Metalle	0,6	4,4
Restabfälle	0,4	2,9
Sonstiges	0,2	1,5

Das Beispielbauwerk ist bereits teilentkernt. Folgende Arbeitsschritte sind ausgeführt und werden in den Beispielbetrachtungen nicht mehr berücksichtigt:

- Demontage des Ziegeldachs und des Dachstuhls (inklusive Dachausbauten aus Holz),
- Demontage der Heizungsanlage,
- Demontage der Sanitärkeramiken, wie Waschbecken und WC,
- Demontage der Stromleitungen,
- Demontage der Fenster mit Rahmen und Türen mit Türzargen sowie Treppengeländer,
- Beseitigung etwaig vorhandener Schadstoffquellen, wie Gipskartonplatten.

Aus diesen Angaben und Festlegungen wird die stoffliche Zusammensetzung des noch abzubrechenden Beispielbauwerks und somit dem anfallenden Mauerwerkbruch (Tab. 11.2) abgeleitet.

Tab. 11.2: Abschätzung der stofflichen Zusammensetzung des Mauerwerkbruchs

Stoffgruppen	Mengenabschätzung				
	[t / 100 m³ BRI]	[t]	[Ma.-%]	[t/m³]	[m³ feste Masse]
Beton und Gesteinskörnungen	11,6	84,5	32,9	2,2	38,4
Klinker und Mauerziegel inkl. Putze und Mörtel	22,4	163,3	63,6	1,6	102,1
Fe-Metalle	0,6	4,4	1,7	7,0	0,6
Kunststoffe	0,2	1,5	0,6	1,5	1,0
Papier/Pappe	0,1	0,7	0,3	1,0	0,7
Holz	0,1	0,7	0,3	0,9	0,8
Weiteres (z. B. Glas)	0,2	1,5	0,6	2,5	0,6
Summe	35,2	256,6	100	-	144,2

11.2.2 Beschreibung der Beispielszenarien

Für die Beispielbetrachtungen gelten insgesamt die Festlegungen aus Kap. 6.4, Kap. 7.1 und Anhang 11.2.1. Darüber hinaus enthält Anhang 11.2.3 eine Übersicht zu technisch-wirtschaftlichen Daten, wie mögliche Leistungskennwerte, für die beim Abbruch und bei der Aufbereitung von Mauerwerk einsetzbaren Anlagenkomponenten, Maschinen und Werkzeuge. Ausgehend von diesen Annahmen und Festlegungen werden drei Beispielszenarien zusammengestellt und nachfolgend näher beschrieben. Die Beschreibung der Szenarien erfolgt nach folgendem Muster:

- Kurzbeschreibung,
- Eingesetzte Abbruchmaschinen und -werkzeuge,
- Eingesetzte Aufbereitungsaggregate,
- Eingesetzte Transporteinheiten und Transportentfernungen,
- Weitere Festlegungen und Annahmen.

Bewertungsszenario 1

Kurzbeschreibung entsprechend Abb. 7.1:

- Abbruch: konventionell, maschinell
- Aufbereitung von gemischtem Mauerwerkbruch: stationär, einstufig
- Anwendung von aufbereitetem Mauerwerkbruch: gemäß Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“

Eingesetzte Abbruchmaschinen und -werkzeuge

Einreißen, Eindrücken und Abgreifen von Mauerwerk erfolgen mittels Hydraulikbagger (Dieselverbrauch 21 l/h) mit Abbruchstiel (Abbruchleistung 25 m³/h).

Eingesetzte Aufbereitungsaggregate

Die einstufige stationäre Aufbereitungsanlage mit einem dimensionierten Durchsatz von 100 t/h (Jahresproduktion 160000 t/a) und einer Anlagenauslastung von 100 % besteht aus den folgenden Komponenten:

- Aufgabebunker mit Vibrationsaufgeber (Nennleistung: 15 kW),
- Vorsieb (Nennleistung 3,6 kW),
- Prallbrecher (Nennleistung 160 kW),
- Überbandmagnet (Nennleistung 10,9 kW, 90 % Ausschleusung von Fe-Metallen),
- Leseband (Nennleistung 7,5 kW, 80 % Ausschleusung Störstoffe, wie Kunststoffe, Papier/Pappe, Holz, Glas),
- Siebmaschine (Nennleistung 18,5 kW),
- Windsichter (Nennleistung 38,5 kW, 80 % Ausschleusung Leichtstoffe, wie Kunststoffe, Papier/Pappe, Holz).

Die stationären Anlagenkomponenten werden mit elektrischem Strom betrieben.

Eingesetzte Transporteinheiten

Als Transporteinheiten kommen Radlader, LKW und Förderbänder zum Einsatz. Sie werden folgendermaßen bilanziert:

- Radlader: Dieselverbrauch 24 l/h bei Nennleistung 147 kW, Ladeleistung 240 t/h,
- LKW: Ladekapazität 25 t, Dieselverbrauch 0,3 l/km bei Nennleistung 220 kW,
- Siebbeschickungsband: Nennleistung 11 kW,
- Haldenbänder: Nennleistung 4 kW (Vorsieb: 0/5, Siebmaschine: 0/5, 5/16, 16/32).

Folgende Transportprozesse sind erforderlich:

- Verladen des aufzubereitenden Mauerwerkbruchs auf der Abbruchstelle mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zur stationären Aufbereitungsanlage,
- Transport des Mauerwerkbruchs von der Abbruchstelle mit einem LKW zur stationären Aufbereitungsanlage: Entfernung 20 km,
- Beschicken der stationären Aufbereitungsanlage mit Radlader,
- Materialtransport zwischen einzelnen Anlagenkomponenten der stationären Aufbereitungsanlage und zum Aufhalten der End- und Zwischenprodukte mit Förderbändern (Siebbeschickungsband, Haldenbänder),
- Verladen zu entsorgender Restmassen auf der stationären Aufbereitungsanlage mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zur Entsorgungsstelle,

- Transport zu entsorgender Restmassen der stationären Aufbereitungsanlage mit einem LKW zur Entsorgungsstelle: Entfernung 50 km,
- Verladen aussortierter Fremdstoffe zur energetischen Verwertung auf der stationären Aufbereitungsanlage mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zur Verbrennungsanlage,
- Transport aussortierter Fremdstoffe zur energetischen Verwertung von der stationären Aufbereitungsanlage mit einem LKW zur Verbrennungsanlage: Entfernung 10 km,
- Verladen aussortierter Fremdstoffe zur stofflichen Verwertung auf der stationären Aufbereitungsanlage mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zur Recyclinganlage,
- Transport aussortierter Fremdstoffe zur stofflichen Verwertung von der stationären Aufbereitungsanlage mit einem LKW zur Recyclinganlage: Entfernung 10 km,
- Verladen des aufbereiteten Mauerwerkbruchs auf der stationären Aufbereitungsanlage mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zum Ort der Anwendung,
- Transport des aufbereiteten Mauerwerkbruchs von der stationären Aufbereitungsanlage mit einem LKW zum Ort der Anwendung: Entfernung 10 km.

Weitere Festlegungen und Annahmen

- Das Vorsieb trennt 10 Ma.-% des angegebenen Materials ab. Das Vorsiebmaterial wird anschließend entsorgt.
- Für den LKW-Transport werden Hin- und Rückfahrt veranschlagt.
- Die Anwendung des aufbereiteten Mauerwerkbruchs und mögliche ökobilanzielle Gutschriften für Primärrohstoffe ergeben sich aus der Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“ vorbehaltlich der nachgeordneten Eignungsprüfungen.
- Für die durch thermische Verwertung von Fremdstoffen gewonnene Energie (Strom, Wärme) werden ökobilanzielle Gutschriften vergeben.
- Für aussortierte Fe-Metalle wird eine ökobilanzielle Gutschrift als Sekundärrohstoff für Bewehrungsstahl von 10 % der anfallenden Menge vergeben.

Bewertungsszenario 2

Kurzbeschreibung entsprechend Abb. 7.2:

- Abbruch: konventionell, maschinell
- Aufbereitung von gemischtem Mauerwerkbruch: mobil
- Anwendung von aufbereitetem Mauerwerkbruch: gemäß Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“

Eingesetzte Abbruchmaschinen und -werkzeuge

Einreißen, Eindrücken und Abgreifen von Mauerwerk erfolgen mittels Hydraulikbagger (Dieselverbrauch 21 l/h) mit Abbruchstiel (Abbruchleistung: 25 m³/h).

Eingesetzte Aufbereitungsaggregate

Die einfache mobile Aufbereitungsanlage mit einem dimensionierten Durchsatz von 100 t/h (Jahresproduktion 160000 t/a) und einer Anlagenauslastung von 100 % besteht aus den folgenden Komponenten:

- kettenmobiler Brecher inkl. Überbandmagnet und Förderbänder (Dieselverbrauch 36 l/h bei Nennleistung 242 kW, 80 % Ausschleusung von Fe-Metallen),
- kettenmobile Siebmaschine inkl. Förderbänder (Dieselverbrauch 15 l/h bei Nennleistung 18 kW).

Eingesetzte Transporteinheiten

Als Transporteinheiten kommen Radlader und LKW zum Einsatz. Sie werden folgendermaßen bilanziert:

- Radlader: Dieselverbrauch 24 l/h bei Nennleistung 147 kW, Ladeleistung 240 t/h,
- LKW: Ladekapazität 25 t, Dieselverbrauch 0,3 l/km bei Nennleistung 220 kW.

Folgende Transportprozesse sind erforderlich:

- Transport des aufzubereitenden Mauerwerkbruchs auf der Abbruchstelle mit Radlader zur mobilen Aufbereitungsanlage (inkl. Beschickung),
- Verladen aussortierter Fremdstoffe zur stofflichen Verwertung (Fe-Metalle) auf der Abbruchstelle mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zur Recyclinganlage,
- Transport aussortierter Fremdstoffe zur stofflichen Verwertung (Fe-Metalle) von der Abbruchstelle mit einem LKW zur Recyclinganlage: Entfernung 10 km,
- Verladen des aufbereiteten Mauerwerkbruchs auf der Abbruchstelle mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zum Ort der Anwendung,
- Transport des aufbereiteten Mauerwerkbruchs von der Abbruchstelle mit einem LKW zum Ort der Anwendung: Entfernung 2 km.

Weitere Festlegungen und Annahmen

- Für den LKW-Transport werden Hin- und Rückfahrt veranschlagt.
- Die Anwendung des aufbereiteten Mauerwerkbruchs und mögliche ökobilanzielle Gutschriften für Primärrohstoffe ergeben sich aus der Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“ vorbehaltlich der nachgeordneten Eignungsprüfungen.

- Für aussortierte Fe-Metalle wird eine ökobilanzielle Gutschrift als Sekundärrohstoff für Bewehrungsstahl von 10 % der anfallenden Menge vergeben.

Bewertungsszenario 3

Kurzbeschreibung entsprechend Abb. 7.3:

- Abbruch: teilselektiv, manuell/maschinell
 - Abbruch von 30 Ma.-% Ziegelmauerwerk: selektiv, manuell
 - Abbruch von verbleibenden Bauwerkteilen: konventionell, maschinell
- Aufbereitung von Ziegelbruch: mobil
- Aufbereitung von gemischtem Mauerwerkbruch: stationär, einstufig
- Anwendung von Ziegelbruch: gemäß Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“
- Anwendung von aufbereitetem Mauerwerkbruch: gemäß Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“

Eingesetzte Abbruchmaschinen und -werkzeuge

Das selektive Abtragen von Ziegelmauerwerk erfolgt manuell mittels eines Presslufthammers mit Kompressor (Dieselverbrauch 7 l/h, Abbruchleistung 1,5 m³/h). Einreißen, Eindrücken und Abgreifen der verbleibenden Bauwerkteile erfolgen mit Hydraulikbagger (Dieselverbrauch 21 l/h) mit Abbruchstiel (Abbruchleistung: 25 m³/h).

Eingesetzte Aufbereitungsaggregate

Die einstufige stationäre Anlage mit einem dimensionierten Durchsatz von 100 t/h (Jahresproduktion 160000 t/a) und einer Anlagenauslastung von 100 % besteht aus den folgenden Komponenten:

- Aufgabebunker mit Vibrationsaufgeber (Nennleistung: 15 kW),
- Vorsieb (Nennleistung 3,6 kW),
- Prallbrecher (Nennleistung 160 kW),
- Überbandmagnet (Nennleistung 10,9 kW, 90 % Ausschleusung von Fe-Metallen),
- Leseband (Nennleistung 7,5 kW, 80 % Ausschleusung Störstoffe, wie Kunststoffe, Papier/Pappe, Holz, Glas),
- Siebmaschine (Nennleistung 18,5 kW),
- Windsichter (Nennleistung 38,5 kW, 80 % Ausschleusung Leichtstoffe, wie Kunststoffe, Papier/Pappe, Holz).

Die stationären Anlagenkomponenten werden mit elektrischem Strom betrieben.

Die einfache mobile Aufbereitungsanlage für die Aufbereitung des reinen Ziegelbruchs mit einem dimensionierten Durchsatz von 100 t/h (Jahresproduktion 160000 t/a) und einer Anlagenauslastung von 100 % besteht aus den folgenden Komponenten:

- kettenmobiler Brecher inkl. Überbandmagnet und Förderbänder (Dieselverbrauch 36 l/h bei Nennleistung 242 kW, 80 % Ausschleusung von Fe-Metallen),
- kettenmobile Siebmaschine inkl. Förderbänder (Dieselverbrauch 15 l/h bei Nennleistung 18 kW).

Eingesetzte Transporteinheiten

Als Transporteinheiten kommen Radlader, LKW und Förderbänder zum Einsatz. Sie werden folgendermaßen bilanziert:

- Radlader: Dieselverbrauch 24 l/h bei Nennleistung 147 kW, Ladeleistung 240 t/h,
- LKW: Ladekapazität 25 t, Dieselverbrauch 0,3 l/km bei Nennleistung 220 kW,
- Siebbeschickungsband: Nennleistung 11 kW,
- Haldenbänder: Nennleistung 4 kW (Vorsieb: 0/5, Siebmaschine: 0/5, 5/16, 16/32).

Folgende Transportprozesse sind erforderlich:

- Transport des Ziegelbruchs auf der Abbruchstelle mit Radlader zur mobilen Aufbereitungsanlage (inkl. Beschickung),
- Verladen des aufbereiteten Ziegelbruchs auf der Abbruchstelle mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zum Ort der Anwendung,
- Transport des aufbereiteten Ziegelbruchs von der Abbruchstelle mit einem LKW zum Ort der Anwendung: Entfernung 10 km.
- Verladen des aufzubereitenden Mauerwerkbruchs auf der Abbruchstelle mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zur stationären Aufbereitungsanlage,
- Transport des Mauerwerkbruchs von der Abbruchstelle mit einem LKW zur stationären Aufbereitungsanlage: Entfernung 20 km,
- Beschicken der stationären Aufbereitungsanlage mit Radlader,
- Materialtransport zwischen einzelnen Anlagenkomponenten der stationären Aufbereitungsanlage und zum Aufhalten der End- und Zwischenprodukte mit Förderbändern (Siebbeschickungsband, Haldenbänder),
- Verladen zu entsorgender Restmassen auf der stationären Aufbereitungsanlage mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zur Entsorgungsstelle,
- Transport zu entsorgender Restmassen der stationären Aufbereitungsanlage mit einem LKW zur Entsorgungsstelle: Entfernung 50 km,
- Verladen aussortierter Fremdstoffe zur energetischen Verwertung auf der stationären Aufbereitungsanlage mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zur Verbrennungsanlage,

- Transport aussortierter Fremdstoffe zur thermischen Verwertung von der stationären Aufbereitungsanlage mit einem LKW zur Verbrennungsanlage: Entfernung 10 km,
- Verladen aussortierter Fremdstoffe zur stofflichen Verwertung auf der stationären Aufbereitungsanlage mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zur Recyclinganlage,
- Transport aussortierter Fremdstoffe zur stofflichen Verwertung von der stationären Aufbereitungsanlage mit einem LKW zur Recyclinganlage: Entfernung 10 km,
- Verladen des aufbereiteten Mauerwerkbruchs auf der stationären Aufbereitungsanlage mit einem Radlader auf einen LKW zum Weitertransport zum Ort der Anwendung,
- Transport des aufbereiteten Mauerwerkbruchs von der stationären Aufbereitungsanlage mit einem LKW zum Ort der Anwendung: Entfernung 10 km.

Weitere Festlegungen und Annahmen

- Das Vorsieb trennt 10 Ma.-% des aufgegebenen Materials ab. Das Vorsiebmaterial wird anschließend entsorgt.
- Für den LKW-Transport werden Hin- und Rückfahrt veranschlagt.
- Die Anwendung des aufbereiteten Mauerwerkbruchs und mögliche ökobilanzielle Gutschriften für Primärrohstoffe ergeben sich aus der Grundbedingung „Stoffliche Zusammensetzung“ vorbehaltlich der nachgeordneten Eignungsprüfungen.
- Für die durch thermische Verwertung von Fremdstoffen gewonnene Energie (Strom, Wärme) werden ökobilanzielle Gutschriften vergeben.
- Für aussortierte Fe-Metalle wird eine ökobilanzielle Gutschrift als Sekundärrohstoff für Bewehrungsstahl von 10 % der anfallenden Menge vergeben.

11.2.3 Technisch-wirtschaftliche Basisdaten für die Beispielbetrachtungen

Tab. 11.3: Mögliche Leistungskennwerte für Abbruchmaschinen und -werkzeuge [147], [252]

Abbruchmaschine	Maschinelle Abbruchverfahren für Mauerwerk	Leistungskennwerte		
		Dienstgewicht Trägergerät [t]	Dieselverbrauch [l/h]	Abbruchleistung [m³ fM/h]
Hydraulikbagger mit Hydraulikhammer	Abtragen	20	21	20
Seilbagger mit Abbruchgreifer	Abgreifen	40	21	15
Seilbagger mit Stahlkörper	Einschlagen	40	21	20
Hydraulikbagger mit Abbruchstiel	Eindrücken/Einreißen	20	21	25
Abbruchbagger mit Seilzug	Einziehen	20	21	8
Abbruchwerkzeug	Manuelle Abbruchverfahren für Mauerwerk	Leistungskennwerte		
		Dieselverbrauch [l/h]	Abbruchleistung [m³ fM/h]	
Presslufthammer mit Kompressor	Abtragen	7	1,5	
Vorschlaghammer	Einschlagen	-	0,8	
Seilwinde	Einziehen	-	3	

fM...feste Masse

Tab. 11.4: Mögliche Leistungskennwerte für Aufbereitungsaggregate [126]

Aufbereitungs- aggregat	Grundoperation der Aufbereitung	Leistungskennwerte					
		Dimensionierter Durchsatz der Aufbereitungsanlage [t/h]			Dimensionierter Durchsatz der Aufbereitungsanlage [t/h]		
		100	200	300	100	200	300
		Nennleistung [kW]			Dieselverbrauch bei Nennleistung [l/h]		
Stationäre Aufbereitungsanlage (mit elektrischem Strom betrieben)							
Aufgabebunker	-	15	22	30			
Vorsieb	Klassieren	3,6	4,2	7,2			
Backenbrecher	Zerkleinern	90					
Prallbrecher	Zerkleinern	160	200	250			
Leseband	Sortieren	7,5	9,2	11			
Überbandmagnet	Sortieren	10,9	10,9	10,9			
Siebmaschine	Klassieren	18,5	22	30			
Windsichter	Sortieren	38,5					
Setzmaschine	Sortieren	36,5					
Farbsortieranlage	Sortieren	7,5					
Mobile Aufbereitungsanlage (mit Diesel betrieben)							
Prallbrecher, kettenmobil	Zerkleinern	242	310		36	44	
Backenbrecher, kettenmobil	Zerkleinern		224			34	
Kegelbrecher, kettenmobil	Zerkleinern		317			40	
Siebmaschine, kettenmobil	Klassieren	106	134		15	18	

Tab. 11.5: Mögliche Leistungskennwerte für Transporteinheiten [126], [250]

Transporteinheit	Leistungskennwerte					
	Dimensionierter Durchsatz der Aufbereitungsanlage					
	[t/h]					
	100		200		300	
	Nennleistung [kW]	Dieselverbrauch bei Nennleistung	Nennleistung [kW]	Dieselverbrauch bei Nennleistung	Nennleistung [kW]	Dieselverbrauch bei Nennleistung
Radlader, Ladeleistung von 240 t/h	147	24 l/h	147	24 l/h	147	24 l/h
LKW, Ladekapazität von 25 t	220	0,3 l/km	220	0,3 l/km	220	0,3 l/km
Förderbänder (mit elektrischem Strom betrieben)	Nennleistung [kW]		Nennleistung [kW]		Nennleistung [kW]	
Haldenband 0/5mm Vorsieb	4		4		4	
Siebbeschickungsband	11		15		18,5	
Haldenband 0/5 mm	4		7,5		7,5	
Haldenband 5/16 mm	4		7,5		7,5	
Haldenband 16/32 mm	4		7,5		7,5	

Tab. 11.6: Mögliche Sortiertiefen für Abbruch- und Aufbereitungsprozesse [33], [126], [249]

Abbruch- und Aufbereitungsprozesse	Maximale Sortiertiefen									
	für ausschleusbare Stoffflüsse (Stoffgruppen gemäß Tab. 6.6)									
	MZ	PB	LB	F _{ges}						
				GI	FE	KU	PP	HZ	GL	F _{Rest}
selektiver Abbruch, maschinell	0,80				0,20					
selektiver Abbruch, manuell	0,80				0,70	0,60		0,95	0,95	
Leseband	0,80			0,80		0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Überbandmagnet					0,90					
Windsichter		0,80				0,80	0,80	0,80		
Setzmaschine		0,65	0,65	0,65						
Farbsortierer	0,60									

F_{Rest} ... F_{ges} ohne GI, FE, KU, PP, HZ, GL

11.2.4 Verwendete GaBi-Datensätze

Tab. 11.7: Übersicht der verwendeten GaBi-Datensätze in der Modellierung mit GaBi 4

Prozesse	GaBi-Datensätze (Stand: 2009)
Diesel	DE: Diesel ab Raffinerie PE
Strom	DE: Strom Mix ELCD/PE-GaBi
LKW	GLO: LKW-Zug/Sattel > 34 - 40 t zGG / 27 t NL / Euro 3 ELCD/PE-GaBi
Thermische Verwertung in MVA: Holz	DE: Holz (naturbel.) in MVA PE
Thermische Verwertung in MVA: Kunststoffe	DE: Kunststoffverpackungen in MVA PE
Thermische Verwertung in MVA: Papier/Pappe	DE: Papier / Pappe in MVA PE
Ökobilanzielle Gutschriften	
Stoffliche Verwertung Fe-Metalle (Recycling)	DE: Bewehrungsstahl (Draht) PE
RC-Baustoff statt natürlicher Gesteinskörnung	DE: Kies (Körnung 2/32) PE
Strom aus thermischer Verwertung	DE: Strom Mix ELCD/PE-GaBi
Wärme aus thermischer Verwertung	DE: Thermische Energie aus Erdgas PE

11.2.5 Einzelergebnisse der Wirksamkeitsanalyse

Tab. 11.8: Ausprägungen und Teilwirksamkeiten der Beispielszenarien

Messbares Zielkriterium				Szenarien					
Nr.	Beschreibung	Einheit	Ziel	1		2		3	
				Ausprägung	Teilwirksamkeit	Ausprägung	Teilwirksamkeit	Ausprägung	Teilwirksamkeit
<i>GWP</i> _{Z1.1.1.1}	Globales Erwärmungspotenzial verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	kg CO ₂ -Äquivalent	Minimierung	697,41	0,00	140,88	0,80	0,17	1,00
<i>GWP</i> _{Z1.1.1.2}	Eingespartes Globales Erwärmungspotenzial durch Einsatz von RC-Baustoffen	kg CO ₂ -Äquivalent	Maximierung	467,79	0,89	528,20	1,00	0,36	0,00
<i>GWP</i> _{Z1.1.1.3}	Eingespartes Globales Erwärmungspotenzial durch stoffliche Verwertung von Fremdstoffen	kg CO ₂ -Äquivalent	Maximierung	237,86	0,92	257,68	1,00	0,03	0,00
<i>GWP</i> _{Z1.1.1.4}	Differenzwert zwischen eingespartem und verursachtem Globalem Erwärmungspotenzial	kg CO ₂ -Äquivalent	Maximierung	-2213,66	0,00	645,00	1,00	0,51	0,77
<i>AP</i> _{Z1.1.2.1}	Versauerungspotenzial verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	kg SO ₂ -Äquivalent	Minimierung	2,27	1,00	0,82	0,00	2,22	0,96
<i>AP</i> _{Z1.1.2.2}	Eingespartes Versauerungspotenzial durch Einsatz von RC-Baustoffen	kg SO ₂ -Äquivalent	Maximierung	2,46	0,00	2,77	1,00	2,51	0,17
<i>AP</i> _{Z1.1.2.3}	Eingespartes Versauerungspotenzial durch stoffliche Verwertung von Fremdstoffen, wie Eisen	kg SO ₂ -Äquivalent	Maximierung	0,40	0,00	0,43	1,00	0,40	0,00
<i>AP</i> _{Z1.1.2.4}	Differenzwert zwischen eingespartem und verursachtem Versauerungspotenzial	kg SO ₂ -Äquivalent	Maximierung	3,31	0,90	2,39	0,00	3,41	1,00
<i>ODP</i> _{Z1.1.3.1}	Ozonabbaupotenzial verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	kg R11-Äquivalent	Minimierung	0,00008	1,00	0,00000	0,00	0,00006	0,80
<i>ODP</i> _{Z1.1.3.2}	Eingespartes Ozonabbaupotenzial durch Einsatz von RC-Baustoffen	kg R11-Äquivalent	Maximierung	0,00005	0,00	0,00006	1,00	0,00005	0,17
<i>ODP</i> _{Z1.1.3.3}	Eingespartes Ozonabbaupotenzial durch stoffliche Verwertung von Fremdstoffen	kg R11-Äquivalent	Maximierung	0,00003	0,00	0,00003	1,00	0,00003	0,00
<i>ODP</i> _{Z1.1.3.4}	Differenzwert zwischen eingespartem und verursachtem Ozonabbaupotenzial	kg R11-Äquivalent	Maximierung	0,00015	0,80	0,00008	0,00	0,00016	1,00
<i>NP</i> _{Z1.1.4.1}	Eutrophierungspotenzial verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	kg PO ₄ ³⁻ -Äquivalent	Minimierung	0,17	1,00	0,06	0,00	0,17	0,96
<i>NP</i> _{Z1.1.4.2}	Eingespartes Eutrophierungspotenzial durch Einsatz von RC-Baustoffen	kg PO ₄ ³⁻ -Äquivalent	Maximierung	0,36	0,00	0,40	1,00	0,36	0,17
<i>NP</i> _{Z1.1.4.3}	Eingespartes Eutrophierungspotenzial durch stoffliche Verwertung von Fremdstoffen	kg PO ₄ ³⁻ -Äquivalent	Maximierung	0,03	0,00	0,03	1,00	0,03	0,00
<i>NP</i> _{Z1.1.4.4}	Differenzwert zwischen eingespartem und verursachtem Eutrophierungspotenzial	kg PO ₄ ³⁻ -Äquivalent	Maximierung	0,50	0,91	0,38	0,00	0,51	1,00
<i>POCP</i> _{Z1.1.5.1}	Sommersmogpotenzial verursacht durch Abbruch, Aufbereitung und Transport	kg C ₂ H ₄ -Äquivalent	Minimierung	0,26	0,98	0,11	0,00	0,26	1,00
<i>POCP</i> _{Z1.1.5.2}	Eingespartes Sommersmogpotenzial durch Einsatz von RC-Baustoffen	kg C ₂ H ₄ -Äquivalent	Maximierung	0,24	0,00	0,27	1,00	0,24	0,17
<i>POCP</i> _{Z1.1.5.3}	Eingespartes Sommersmogpotenzial durch stoffliche Verwertung von Fremdstoffen	kg C ₂ H ₄ -Äquivalent	Maximierung	0,07	0,00	0,07	1,00	0,07	0,00
<i>POCP</i> _{Z1.1.5.4}	Differenzwert zwischen eingespartem und verursachtem Sommersmogpotenzial	kg C ₂ H ₄ -Äquivalent	Maximierung	0,41	0,99	0,23	0,00	0,41	1,00
<i>U</i> _{Z1.1.1}	Anzahl schwerer und tödlicher Unfälle	-	Minimierung	-	0,00	-	0,00	-	0,00
<i>PEI</i> _{Z2.1.1.1}	Primärenergiebedarf bei Abbruch, Aufbereitung und Transport	MJ	Minimierung	44262,62	0,04	19643,29	1,00	45207,38	1,00
<i>PEI</i> _{Z2.1.1.2}	Eingesparte Energiemenge in der Primärrohstoffproduktion durch Einsatz von RC-Baustoffen	MJ	Maximierung	7771,03	0,00	8774,53	1,00	7937,70	0,17
<i>PEI</i> _{Z2.1.1.3}	Eingesparte Energiemenge in der Primärrohstoffproduktion durch stoffl. Verwertung von Fremdst.	MJ	Maximierung	3954,42	0,00	4283,96	1,00	3954,42	0,00
<i>PEI</i> _{Z2.1.1.4}	Gewonnene Energiemenge durch thermische Verwertung von Fremdstoffen, wie Kunststoffen	MJ	Maximierung	10166,58	1,00	0,00	0,00	10166,58	1,00
<i>PEI</i> _{Z2.1.1.5}	Differenzwert zwischen eingesparten/gewonnenen und verbrauchten Energiemengen	MJ	Maximierung	-22370,58	0,05	-6584,80	1,00	-23148,67	0,00
<i>M</i> _{Z2.2.1.1}	Materialmenge der hergestellten RC-Baustoffe	kg	Maximierung	223800	0,00	252700	1,00	228600	0,17
<i>M</i> _{Z2.2.1.2}	Materialmenge der stofflich verwerteten Fremdstoffe	kg	Maximierung	3600	0,00	3900	1,00	3600	0,00
<i>M</i> _{Z2.2.1.3}	Eingesparte Materialmengen durch RC-Baustoffe und stoffl. Verwertung von Fremdst.	kg	Maximierung	227400	0,00	256600	1,00	232200	0,16
<i>M</i> _{Z2.3.1.1}	Zu entsorgende Materialmengen	kg	Minimierung	26700	0,00	0	1,00	21900	0,82

11.2.6 Kostenermittlung für die Beispielszenarien

Tab. 11.9: Überschlägige Abbruchkosten nach LUBW [161]

Bewertungsszenario	1	2	3
Brutto-Rauminhalt (BRI) des Beispielbauwerks in [m³]	729,00	729,00	729,00
Geschätzte Masse des Beispielbauwerks in [t]	256,60	256,60	256,6
Abbruchmethode	konventionell	konventionell	teilselektiv
Abbruchkosten gemäß LUBW [161] in [€/m³ BRI]	3,00	3,00	6,00
Abbruchkosten in [€]	2187,00	2187,00	4374,00
Abbruchkosten in [€/t]	8,50	8,50	17,00

Tab. 11.10: Überschlägige Aufbereitungskosten nach Herbst et al. [126]

Bewertungsszenario	1	2	3
Masse Aufgabegut (Mauerwerkbruch, gemischt) in [t]	256,6	256,6	207,6
Aufbereitungskosten (Mauerwerkbruch, gemischt) gemäß Herbst et al. [126] in [€/t]	7,45	5,25	7,45
Aufbereitungskosten (Mauerwerkbruch, gemischt) in [€]	1911,67	1347,15	1546,62
Masse Aufgabegut (Ziegelbruch, sortenrein) in [t]	0,0	0,0	49,0
Aufbereitungskosten (Ziegelbruch, sortenrein) gemäß Herbst et al. [126] in [€/t]	0,0	0,0	5,25
Aufbereitungskosten (Ziegelbruch, sortenrein) in [€]	0,0	0,0	257,25
Summe Aufbereitungskosten in [€]	1911,67	1347,15	1803,87

Tab. 11.11: Überschlägige Transportkosten für Abbruchmaterialien

Bewertungsszenario	1	2	3
Summe der LKW-Transportentfernungen für Abbruchmaterialien in [km]	900,0	64,0	840,0
geschätzte LKW-Transportkosten für Abbruchmaterialien in [€/km]	1,50	1,50	1,50
LKW-Transportkosten für Abbruchmaterialien in [€]	1350,00	96,00	1260,00

Tab. 11.12: Überschlägige Entsorgungskosten

Bewertungsszenario	1	2	3
Masse Vorsiebmaterial in [t]	25,6	0,0	20,8
Entsorgungskosten Vorsiebmaterial gemäß Herbst et al. [126] in [€/t]	13,00	13,00	13,00
Entsorgungskosten Vorsiebmaterial in [€]	332,8	0,00	270,40
Masse aussortierter Fremd- und Störstoffe zur Entsorgung in [t]	1,1	0,0	1,1
geschätzte Entsorgungskosten aussortierter Fremd- und Störstoffe zur Entsorgung in [€/t]	120,00	120,00	120,00
Entsorgungskosten aussortierter Fremd- und Störstoffe in [€]	132,00	0,00	132,00
Summe Entsorgungskosten in [€]	464,80	0,00	402,40

Tab. 11.13: Überschlägige Erlöse

Bewertungsszenario	1	2	3
Masse Fe-Metalle in [t]	3,6	3,9	3,6
Erlös Fe-Metalle gemäß Herbst et al. [126] in [€/t]	120,00	120,00	120,00
Erlös Fe-Metalle in [€]	432,00	468,00	432,00
Masse RC-Baustoff (Mauerwerkbruch, gemischt) in [t]	223,8	252,7	179,6
Anwendungsbereich für RC-Baustoff (Mauerwerkbruch, gemischt)	rezyklierte Gesteinskörnung für Beton, Liefertyp 4	mineralische Dämm-schüttung	rezyklierte Gesteinskörnung für Beton, Liefertyp 4
Erlös RC-Baustoff (Mauerwerkbruch, gemischt) gemäß Herbst et al. [126] für Anwendungsbereich in [€/t]	5,00	1,00	5,00
Erlös RC-Baustoff (Mauerwerkbruch, gemischt) für Anwendungsbereich in [€]	1119,00	252,70	898,00
Masse RC-Baustoff (Ziegelbruch, sortenrein) in [t]	0,0	0,0	49,0
Anwendungsbereich für RC-Baustoff (Ziegelbruch, sortenrein)	-	-	Zierkies
Erlös RC-Baustoff (Ziegelbruch, sortenrein) gemäß Herbst et al. [126] für Anwendungsbereich in [€/t]	-	-	5,00
Erlös RC-Baustoff (Ziegelbruch, sortenrein) für Anwendungsbereich in [€]	0,00	0,00	245,00
Summe Erlöse in [€]	1551,00	720,70	1575,00